



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO CONFORME A
REGLAMENTO PARA MARCOS DÚCTILES DE
CONCRETO REFORZADO CON DISIPADORES DE
ENERGÍA HISTERÉTICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
P R E S E N T A

ANDRÉS GAMA CONTRERAS

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

MÉXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 2015

A mis padres

Paula Contreras Flores y Andrés Gama García

A mis hermanos

Stephanie Gama Conteras y Cuauhtémoc Gama Contreras

A mi novia

Brianda Dafne Garduño Escoto

ÍNDICE

1. Estado del arte en la disipación pasiva de energía	1
1.1. Introducción	1
1.2. Disipación pasiva de energía y su relación con la filosofía actual de diseño sísmico	2
1.3. Clasificación de los dispositivos disipadores de energía pasivos	3
1.3.1. Dispositivos por Histéresis	3
1.3.2. Dispositivos Friccionantes	4
1.3.3. Dispositivos Viscoelásticos	5
1.3.4. Disipadores viscosos	6
1.4. Estado del arte en investigación de disipadores por histéresis del material	7
1.4.1. Dispositivos ADAS	8
1.4.1.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales	8
1.4.1.2. Modelado y análisis	9
1.4.2. Dispositivo TADAS	11
1.4.2.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales	12
1.4.2.2. Modelado y análisis	12
1.4.3. Dispositivo Solera	13
1.4.3.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales	13
1.4.3.2. Modelado y análisis	14
1.4.4. Dispositivo BRB (contraviento restringido contra pandeo)	15
1.4.4.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales	16
1.4.4.2. Modelado y análisis	16
1.5. Estado del arte en aplicaciones de disipadores de energía por histéresis del material en estructuras existentes de concreto reforzado	17
1.5.1. México (reparación y diseño original)	17
1.5.2. Ámbito mundial (Reparación y diseño original)	18

2. Reglamentaciones y propuestas de reglamentación existentes	19
2.1. Introducción	19
2.2. Reglamentación existente en el ámbito internacional para el diseño de marcos dúctiles de concreto con disipadores de energía por histéresis	20
2.3. Propuestas de reglamentación existentes para el diseño de marcos dúctiles de concreto con disipadores de energía por histéresis en México	21
2.3.1. Reglamentos de diseño sísmico vigentes	21
2.3.2. Recomendaciones de diseño por desempeño	22
3. Metodología de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto con disipadores histeréticos utilizando criterios de diseño por capacidad	24
3.1. Introducción	24
3.2. Modelos y casos de estudio	25
3.2.1. Selección de la configuración estructural y número de los niveles de los marcos en estudio	25
3.2.2. Selección de los parámetros α y β , con base en las relaciones de rigideces propuestas	27
3.3. Criterios del diseño por capacidad	29
3.4. Objetivos de diseño	30
3.5. Metodología para el diseño del sistema gravitacional y el sistema disipador	31

4. Determinación de los parámetros de diseño sísmico requeridos para marcos dúctiles con disipadores hysteréticos conforme a la normativa considerada	45
4.1. Introducción	45
4.2. Análisis estático no lineal	46
4.2.1. Curva de capacidad global	47
4.2.2. Curva de capacidad a nivel elemento (momento-giro plástico)	48
4.2.3. Modelado de vigas	48
4.2.4. Modelado de columnas	49
4.2.5. Modelado de dispositivos hysteréticos	49
4.2.6. Modelado de contravientos	50
4.3. Descripción de la presentación de resultados	50
4.3.1. Resumen de diseño	50
4.3.2. Resistencias de diseño	50
4.3.3. Ductilidades y sobrerresistencias	51
4.3.4. Curvas de capacidad global	51
4.3.5. Ductilidad de los disipadores	52
4.3.6. Curvas de capacidad por entrepisos	53
4.3.7. Envoltentes de distorsión	54
4.3.8. Mapeo de articulaciones plásticas	54
4.4. Modelos de 5 Niveles	55
4.4.1. Observaciones generales de los modelos de 5 niveles	61
4.4.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales	62
4.4.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador	63

4.4.1.3	Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador	67
4.4.1.4.	Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador	68
4.4.1.5.	Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d	68
4.4.1.6.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio	70
4.4.1.7.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional	70
4.5.	Modelos de 10 Niveles	70
4.5.1.	Observaciones generales de los modelos de 10 niveles	78
4.5.1.1.	Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales	79
4.5.1.2.	Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador	80
4.5.1.3.	Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador	83
4.5.1.4.	Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema Disipador	83
4.5.1.5.	Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d	83
4.5.1.6.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio	85
4.5.1.7.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional	86
4.6.	Modelos de 15 Niveles	86
4.6.1.	Observaciones generales de los modelos de 15 niveles	95
4.6.1.1.	Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales	95
4.6.1.2.	Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema Disipador	96
4.6.1.3.	Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador	102
4.6.1.4.	Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador	102
4.6.1.5.	Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d	103
4.6.1.6.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio	103
4.6.1.7.	Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional	103
4.7.	Modelos de 20 Niveles	103
4.7.1.	Observaciones generales de los modelos de 20 niveles	113
4.7.1.1.	Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no Lineales	113
4.7.1.2.	Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador	114
4.7.1.3.	Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador	120
4.7.1.4.	Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador	121

4.7.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d	121
4.7.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio	121
4.7.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional	121
4.8. Modelos de 25 Niveles	122
4.8.1. Observaciones generales de los modelos de 25 niveles	132
4.8.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales	132
4.8.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador	133
4.8.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema Disipador	138
4.8.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema Disipador	138
4.8.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d	138
4.8.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio	138
4.8.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional	138
5. Conclusiones y recomendaciones	139
5.1. Resumen	139
5.2. Conclusiones	140
5.3. Recomendaciones	141
REFERENCIAS	142
APÉNDICE A	CD-ROM
APÉNDICE B	CD-ROM

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Dispositivos por histéresis, (Adaptado de Symans <i>et al.</i> 2008)	4
Figura 1.2	Dispositivos friccionantes, (Adaptado de Symans <i>et al.</i> 2008)	5
Figura 1.3	Dispositivos Viscoelásticos, (Adaptado de Symans <i>et al.</i> 2008)	6
Figura 1.4	Dispositivos Viscosos, (Adaptado de Symans <i>et al.</i> 2008)	7
Figura 1.5	Dispositivo ADAS	8
Figura 1.6	Dispositivo ADAS	9
Figura 1.7	Ciclo de histéresis típico de una prueba experimental de un dispositivo ADAS, (Adaptado de Aiken <i>et al.</i> 1993)	9
Figura 1.8	Comportamiento de la rigidez de un dispositivo ADAS	10
Figura 1.9	Dispositivo TADAS	11
Figura 1.10	Dispositivo TADAS	12
Figura 1.11	Dispositivo Solera (Adaptado de González 1990)	13
Figura 1.12	Dispositivo Solera	14
Figura 1.13	Dispositivo BRB	15
Figura 1.14	Hospital de Cardiología, Dispositivo ADAS (Tena 2008)	17
Figura 1.15	Complejo de Oficinas Centrales del IMSS, Dispositivos ADAS (Tena 2008)	17
Figura 1.16	Torre Monterrey, Dispositivo ADAS (Tena 2008)	18
Figura 1.17	Mar azul, Dispositivos ADAS (Tena 2008)	18
Figura 3.1	Elevación y planta de la configuración estructural de los modelos	25
Figura 3.2	Niveles y cambios de sección para los modelos de estudio	26
Figura 3.3	Sistema total, sistema gravitacional y sistema disipador	27
Figura 3.4	Modelos de estudio	28
Figura 3.5	Identificación y jerarquización de modos de comportamiento y falla (adaptada de Paulay 1996).	29
Figura 3.6	Estados límite de la curva de capacidad global	30
Figura 3.7	Comportamiento ideal de los sistemas, (Adaptado de Terán 2014)	31
Figura 3.8	Metodología de diseño	32
Figura 3.9	Sistema de piso	34

Figura 3.10	Geometría en los elementos	35
Figura 3.11	Comportamiento del dispositivo histerético	37
Figura 3.13	Capacidad a corte, (Adaptado de Terán 2014)	41
Figura 3.14	Momentos de diseño en columnas, (Adaptado de Terán 2014)	42
Figura 3.15	Cortantes de diseño en columnas	42
Figura 3.16	Diseño a corte en columnas, (Adaptado de Terán 2014)	43
Figura 3.17	Comportamiento de las conexiones, (Adaptado de Terán 2014)	43
Figura 3.18	Comportamiento de las conexiones, Adaptado de Terán 2014)	44
Figura 4.1	Estados límite de la curva de capacidad global, (Adaptado de Terán 2014)	47
Figura 4.2	Ductilidad y sobrerresistencia de la curva de capacidad global	47
Figura 4.3	Curvas de capacidad a nivel elemento	48
Figura 4.4	Curva de capacidad, típica	51
Figura 4.5	Curvas de capacidad de los disipadores, típica	52
Figura 4.6	Curvas de capacidad de cada entrepiso, típica	53
Figura 4.7	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, típica	54
Figura 4.8	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, típico	54
Figura 4.9	Casos de estudio	55
Figura 4.10	Curva de capacidad global, $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	57
Figura 4.11	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	57
Figura 4.12	Curva de capacidad global, $N = 5, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	59
Figura 4.13	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	59
Figura 4.14	Curva de capacidad global, $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	61
Figura 4.15	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	61
Figura 4.16	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas modelos, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	63
Figura 4.17	Curva de capacidad modelos, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	64
Figura 4.18	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	65
Figura 4.19	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	66

Figura 4.20	Curvas de capacidad de los disipadores, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	69
Figura 4.21	Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	72
Figura 4.22	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	73
Figura 4.23	Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	75
Figura 4.24	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	75
Figura 4.25	Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	77
Figura 4.26	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	78
Figura 4.27	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	80
Figura 4.28	Curva de capacidad modelos, $N = 10, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	81
Figura 4.29	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 10, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	82
Figura 4.30	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, $N = 10, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	82
Figura 4.31	Curvas de capacidad de los disipadores, $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	84
Figura 4.32	Curvas de capacidad de los disipadores, $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	84
Figura 4.33	Curvas de capacidad de los disipadores, $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	85
Figura 4.34	Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	88
Figura 4.35	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	89
Figura 4.36	Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	91
Figura 4.37	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	92
Figura 4.38	Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	94
Figura 4.39	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	95
Figura 4.40	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 15, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$;	97
Figura 4.41	Curva de capacidad modelos, $N = 15, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	98
Figura 4.42	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	99
Figura 4.43	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	100
Figura 4.44	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	101
Figura 4.45	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, $N = 15, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	102

Figura 4.46	Curva de capacidad global, $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	106
Figura 4.47	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	106
Figura 4.48	Curva de capacidad global, $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	109
Figura 4.49	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	109
Figura 4.50	Curva de capacidad global, $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	112
Figura 4.51	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	112
Figura 4.52	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 20, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	114
Figura 4.53	Curva de capacidad modelos, $N = 20, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	116
Figura 4.54	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	117
Figura 4.55	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	118
Figura 4.56	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	119
Figura 4.57	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, $N = 20, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	120
Figura 4.58	Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	125
Figura 4.59	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	125
Figura 4.60	Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	128
Figura 4.61	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	128
Figura 4.62	Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	131
Figura 4.63	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$	131
Figura 4.64	Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	133
Figura 4.65	Curva de capacidad modelos, $N = 25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	134
Figura 4.66	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	135
Figura 4.67	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	136
Figura 4.68	Curvas de capacidad por entrepisos modelos, $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	137
Figura 4.69	Envoltentes de distorsiones de entrepisos, $N = 25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$	138

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE EN LA DISIPACIÓN

PASIVA DE ENERGÍA

1.1. Introducción

Los terremotos son eventos potencialmente devastadores que impactan en todas las funciones de la sociedad, con pérdidas de vidas humanas, destrucción parcial o total de la propiedad, interrumpen los servicios médicos y también conllevan a pérdidas económicas importantes.

Investigadores relacionados con la ingeniería sísmica, se han dedicado a tratar de mitigar las consecuencias de los terremotos. Así, se han desarrollado tecnologías para controlar la respuesta de las estructuras ante dichos eventos; nuevos conceptos se han desarrollado para la protección estructural. Los sistemas modernos de protección estructural pueden ser divididos en:

- Aislamiento sísmico
- Sistemas semiactivos y activos
- Disipadores de energía pasivos

El avance tecnológico es frenético en el mundo actual, en la industria de la construcción mexicana se empiezan a implantar propuestas novedosas que impactan en la manera que se conciben, diseñan y construyen los edificios.

1.2. Disipación pasiva de energía y su relación con la filosofía actual de diseño sísmico

Durante un sismo una cantidad finita de energía es introducida a una estructura, esta energía introducida es transformada en energía cinética y potencial, la energía potencial a su vez es transformada en energía térmica y ésta a su vez en entropía tal como lo propusieron Uang y Bertero en la década de los 90 (Constantinou 1994). El desempeño estructural puede ser mejorado si una porción de la energía introducida pudiera ser absorbida, no por la estructura en sí, sino por algún tipo de dispositivo suplementario.

En el enfoque de diseño convencional, un desempeño estructural aceptable es logrado a través de deformaciones inelásticas, estas tienen un efecto directo en el incremento de la energía disipada, esto también tiene un efecto indirecto, la aparición de deformaciones inelásticas conlleva a la flexibilización del sistema estructural lo cual en sí mismo modifica la energía absoluta de entrada. En efecto el incremento en la flexibilidad actúa como un filtro el cual refleja una porción de la energía del sismo.

La relación básica de energía de una estructura es representada en la siguiente ecuación dada por Uang y Bertero (Constantinou 1994):

$$E_i = E_k + E_s + E_a + E_d \quad 1.1$$

donde:

E_i : Energía sísmica de entrada.

E_k : Energía cinética.

E_s : Energía de deformación elástica.

E_a : Energía de amortiguamiento.

E_d : Energía por deformación inelástica o ductilidad (amortiguamiento adicional ó energía de amortiguamiento por histéresis)

Se entiende por disipación pasiva, cuando no se adiciona energía en la relación básica de energía, es decir, la disipación pasiva es de carácter reactivo, cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo.

El objetivo de incluir disipadores de energía pasivos en una estructura, para adicionar sismorresistencia, es concentrar el comportamiento histéretico en regiones especialmente diseñadas y detalladas de la estructura y para evitar el comportamiento inelástico en elementos estructurales, cuya principal función es resistir las fuerzas de gravedad.

Los sistemas pasivos abarcan una gama de materiales y dispositivos para mejorar la amortiguación estructural, rigidez y resistencia, y son usados para mitigar el peligro sísmico y para la rehabilitación por envejecimiento o por deficiencias estructurales. En general, tales sistemas son caracterizados por su capacidad para mejorar la disipación de energía en los sistemas estructurales en los cuales se instalan. Estos dispositivos generalmente operan bajo principios, tales como: deslizamiento friccionante, fluencia de metales, transformación de fase en metales, deformación viscoelástica en sólidos y fluidos. El uso de dispositivos de disipación pasiva de energía es deseable por las siguientes razones presentadas por Sadek *et al.* (1996):

- Los dispositivos disipadores puede proveer a la estructura de rigidez adicional y amortiguamiento para reducir la respuesta.
- La disipación de energía en estructuras puede ser confinada principalmente a los dispositivos disipadores.
- Resulta más factible garantizar la demanda de ductilidad.
- El daño en la estructura puede ser concentrado principalmente a los dispositivos disipadores los cuales pueden ser fácilmente remplazados ya que estos no afectan el funcionamiento de los elementos estructurales que resisten las cargas debidas a la gravedad.

1.3. Clasificación de los dispositivos disipadores de energía pasivos

Los disipadores de energía pueden ser clasificados según su comportamiento como: histeréticos, friccionantes, viscoelásticos y viscosos. En esta sección se explicará brevemente el funcionamiento de cada tipo de dispositivo. De manera concisa se expondrán las principales ventajas y desventajas de los dispositivos disipadores de energía presentados.

1.3.1. Dispositivos por Histéresis

Los disipadores histeréticos se basan en la plastificación de metales (deformación inelástica); estos dispositivos dependen básicamente del desplazamiento (figura 1.1). La plastificación de metales se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de flexión, corte, torsión o extrusión puede conducir a procesos de plastificación de metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores de energía. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece (maleabilidad y soldabilidad), su bajo costo y su elevada ductilidad.

Los disipadores por histéresis presentan ciclos histeréticos idealizados geométricamente como romboides (figura 1.1). Su comportamiento depende del desplazamiento, su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a otros disipadores (Symans *et al.* 2008):

- Comportamiento histerético estable
- Fiabilidad a largo plazo
- Insensibilidad a la temperatura ambiente
- Material y comportamiento familiar para los ingenieros prácticos

Su principal desventaja sería (Symans *et al.* 2008):

- Comportamiento no lineal de los dispositivos que podría requerir de un análisis estructural no lineal

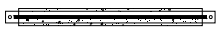
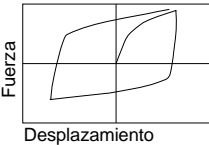
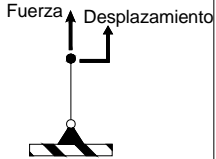
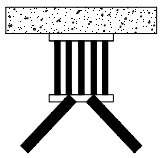
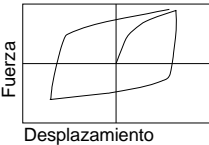
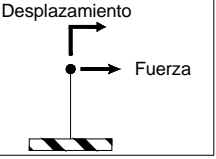
AMORTIGUADOR METÁLICO	CONSTRUCCIÓN BÁSICA	COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO IDEALIZADO	MODELO FÍSICO IDEALIZADO
BRB			
ADAS y TADAS			

Figura 1.1. Dispositivos por histéresis, (Adaptado de Symans *et al.* 2008)

1.3.2. Dispositivos Friccionantes

Los disipadores friccionantes (figura 1.2) son dispositivos que disipan la energía mediante las fuerzas de fricción que se presentan por el desplazamiento relativo entre dos superficies de contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en el intervalo lineal elástico, mientras que esta influencia puede ser significativa si la estructura entra en el intervalo de comportamiento no lineal.

Los dispositivos por fricción localizados en las intersecciones de contravientos en "X" fueron propuestos por Pall en 1982, 1987 y usados en varios edificios en Canadá (Constantinou 1994). Estudios experimentales realizados por Filiatrault en 1985 y Aiken en 1988 confirmaron que los dispositivos de fricción pueden mejorar el desempeño sismorresistente (Constantinou 1994). Los dispositivos proveen un incremento sustancial en la capacidad de disipación de energía y reducen los desplazamientos en comparación con los marcos sismorresistentes.

Los disipadores friccionantes presentan ciclos histeréticos idealizados geoméricamente como rectángulos (figura 1.2). Su comportamiento depende del desplazamiento, su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a otros disipadores (Symans *et al.* 2008):

- Gran disipación de energía por ciclo.
- No dependen de la temperatura ambiente

Entre sus principales desventajas se puede mencionar (Symans *et al.* 2008):

- Las condiciones de la interfaz deslizante pueden cambiar con el tiempo (incertidumbres de fiabilidad)
- Comportamiento fuertemente no lineal, lo que puede excitar modos superiores y, por lo tanto, requerir de un análisis no lineal.
- Posiblemente se presenten desplazamientos permanentes en la estructura si el sistema no es provisto con un mecanismo de restauración.


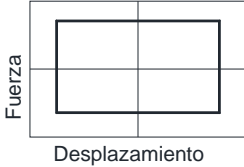
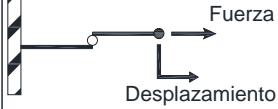
	CONSTRUCCIÓN BÁSICA	COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO IDEALIZADO	MODELO FÍSICO IDEALIZADO
AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN			

Figura 1.2. Dispositivos friccionantes, (Adaptado de Symans *et al.* 2008)

1.3.3. Dispositivos Viscoelásticos

Los disipadores viscoelásticos inicialmente fueron desarrollados por 3M y constan de dos capas de polímeros acrilatos (no obstante se han desarrollado otros dispositivos viscoelásticos genéricos). Hay actualmente cuatro tipos de polímeros altamente disipadores (Aiken *et al.* 1993). El comportamiento del material depende de varios módulos relacionados con la fuerza cortante desarrollada en el material, y la proporción entre ambas capas de polímeros (figura 1.3). Estas propiedades son dependientes de la frecuencia, temperatura y niveles de deformación unitaria (Whittaker *et al.* 1999).

Los disipadores viscoelásticos presentan ciclos histeréticos característicamente elípticos (figura 1.3). Su comportamiento depende del desplazamiento y la velocidad; su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural. Presentan algunas ventajas con relación a otros disipadores (Aiken *et al.* 1993 y Symans *et al.* 2008):

- No requieren de una gran fuerza para lograr disipar energía (se activa a desplazamientos pequeños, de hecho, sus primeros usos fueron en control de vibraciones)
- No cambian de forma significativa los períodos de vibración de la estructura, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla.

Entre sus principales desventajas se puede mencionar (Aiken *et al.* 1993 y Symans *et al.* 2008):

- La poca variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante.
- Capacidad limitada de deformación (El sistema no admite deformaciones grandes).

- Los materiales viscoelásticos, en general son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación y resulta necesario minimizar la influencia de estas variable en sus intervalos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible.
- Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.
- Posible pérdida de adherencia y desgarro del material viscoelástico (incertidumbres de fiabilidad)

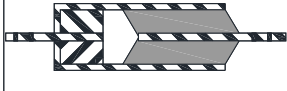

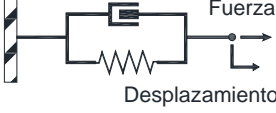
	CONSTRUCCIÓN BÁSICA	COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO IDEALIZADO	MODELO FÍSICO IDEALIZADO
AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO SÓLIDO			

Figura 1.3. Dispositivos Viscoelásticos, (Adaptado de Symans *et al.* 2008)

1.3.4. Disipadores viscosos

Básicamente un amortiguador viscoso es comparable a los amortiguadores utilizados en los autos con la diferencia que los utilizados en estructuras operan en un intervalo de fuerzas más alto. Además, los amortiguadores utilizados en estructuras son considerablemente mayores en tamaño que los usados en los autos y también son contruidos en acero inoxidable y otros materiales extremadamente duraderos, los cuales tienen una duración de por lo menos 40 años. El fluido de estos amortiguadores tiene las siguientes propiedades generales: es inerte, no inflamable, no tóxico, y estable por largos periodos de tiempo.

Los dispositivos de fluido viscoso disipan energía debido a la resistencia opuesta por un fluido a un cuerpo que se mueve en él. Se idealiza como una fuerza proporcional a la velocidad del movimiento y, por lo tanto, también a la frecuencia de vibración (figura 1.4). Los amortiguadores viscosos han sido utilizados con éxito en estructuras civiles, especialmente en áreas geográficas de alta sismicidad. La aplicación principal de estos dispositivos ha sido en edificios de mediana y gran altura, y en la rehabilitación de estructuras históricas. También se han utilizado para renovar estructuras existentes de forma tal que éstas cumplan con los requerimientos modernos que exigen los códigos de diseño estructural. De hecho, la adición de amortiguadores viscosos a una estructura puede elevar el amortiguamiento de la estructura a un 30 % del amortiguamiento crítico o más. (Constantinou *et al.* 1994 y Sadek *et al.* 1996).

Por consiguiente, esta adición puede reducir las aceleraciones y desplazamientos laterales por un 50% respecto a la estructura sin amortiguadores (Constantinou *et al.* 1994 y Sadek *et al.* 1996).

Los disipadores viscosos presentan ciclos histeréticos característicamente elípticos (figura 1.4). Su comportamiento depende del desplazamiento y la velocidad, su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a otros disipadores (Symans *et al.* 2008):

- No requieren de una gran fuerza para lograr disipar energía (se activa a desplazamientos pequeños)
- Fuerza de recuperación mínima.
- Para amortiguamiento lineal, el modelado del amortiguador es simplificado debido a que la fuerza es linealmente dependiente de la velocidad.
- Las propiedades del dispositivo son independientes de la frecuencia y de la temperatura.
- Historial probado de rendimiento en aplicaciones militares.

Entre sus principales desventajas se puede mencionar (Symans *et al.* 2008):

- Posibles pérdidas del fluido viscoso contenido en los cilindros (incertidumbres en la fiabilidad)
- Mantenimiento frecuente y costos altos de mantenimiento.

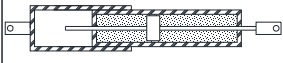
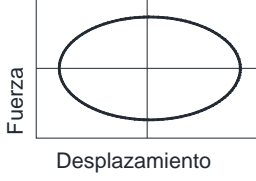
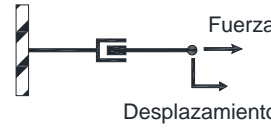
	CONSTRUCCIÓN BÁSICA	COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO IDEALIZADO	MODELO FÍSICO IDEALIZADO
AMORTIGUADOR VISCOSO			

Figura 1.4. Dispositivos Viscosos, (Adaptado de Symans *et al.* 2008)

1.4. Estado del arte en investigación de disipadores por histéresis del material

Uno de los grandes retos del proyectista cuando estudia una estructura con elementos disipadores de energía es el desarrollar un modelo que sea representativo de la estructura en cuestión y que resulte eficiente para fines de análisis y diseño. En los análisis no lineales de estructuras con disipadores de energía, conviene modelar con rigor e independientemente tanto a los disipadores como a los contravientos, ya que permite monitorear por separado el comportamiento de los elementos disipadores y de las diagonales, además de apreciar el trabajo en conjunto, lo que no puede hacerse cabalmente con los modelos aproximados (Tena 2000).

1.4.1. Dispositivos ADAS

Uno de los dispositivos metálicos más conocidos es el ADAS (Added Damping and Stiffness, figura 1.5), cuyos principios fundamentales tienen sus antecedentes en los trabajos de Kelly y de Skinner. Es un dispositivo compuesto por un conjunto de placas de acero paralelas, de espesor constante y sección transversal en forma de X, tal que frontalmente, es similar a dos trapecios unidos por la base menor. El número de placas es variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora (Aiken 1993).

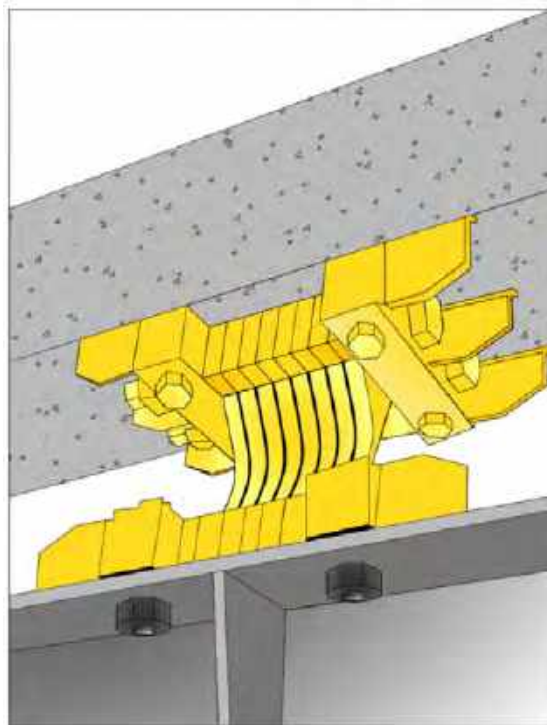


Figura 1.5. Dispositivo ADAS

1.4.1.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales

Cada placa del dispositivo ADAS se encuentra impedida del giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétrica y con doble curvatura generando un diagrama de esfuerzos de flexión casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro (figura 1.6). Esto ocasiona que el esfuerzo de fluencia se alcance prácticamente en todo el volumen en un corto intervalo de desplazamiento. La plastificación se produce en forma uniforme, estable y sin degradación (Figura 1.7), optimizando el proceso de disipación de energía (Aiken *et al.* 1993 y Jara 1994).

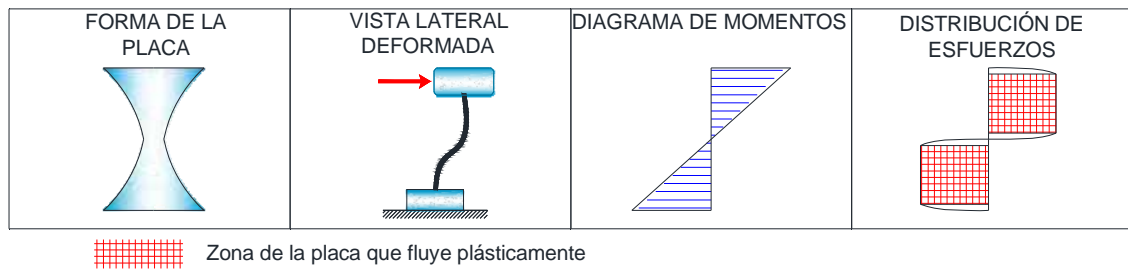


Figura 1.6. Dispositivo ADAS

Pruebas de laboratorio llevadas a cabo por programas de investigación experimental en la Universidad de California (figura 1.7), proveen datos experimentales que demuestran que los dispositivos ADAS poseen características que los hacen adecuados para su uso en la disipación de energía en estructuras nuevas o reestructuradas. El sistema ADAS montado sobre contravientos tipo Chevron debe ser diseñado usando los principios de diseño por capacidad, basado en la resistencia a fuerza cortante de un elemento ADAS de por lo menos dos veces la resistencia a la fluencia del dispositivo. El desempeño de los dispositivos ADAS es influenciado por el grado de restricción relativo entre la base y la cabeza (Aiken *et al.* 1993).

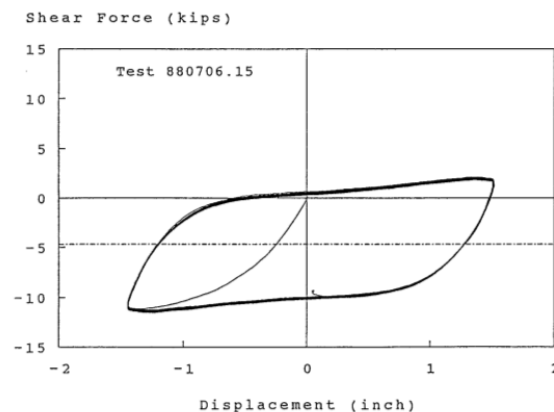


Figura 1.7. Ciclo de histéresis típico de una prueba experimental de un dispositivo ADAS, (Adaptado de Aiken *et al.* 1993)

1.4.1.2. Modelado y análisis

De acuerdo con el modelo propuesto por Arturo Tena (figura 1.8) en la década de los noventa la rigidez elástica inicial del dispositivo ADAS (K_{DDE}) dispuesto en un contraviento Chevron y la capacidad última a cortante de un dispositivo ADAS (F_u) estaría dada por (Tena 2000):

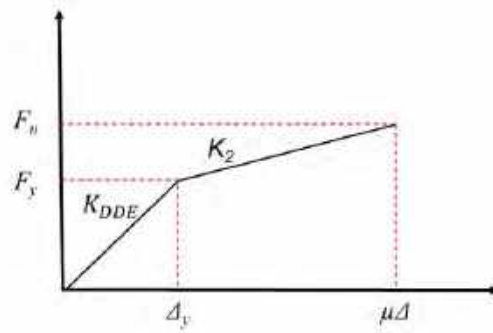


Figura 1.8. Comportamiento de la rigidez de un dispositivo ADAS

$$K_{DDE} = K_{ADAS} = n \frac{f_{66}}{f_{22}f_{66} - f_{26}^2} \quad 1.2$$

$$f_{22} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h^3}{2b_1 \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \left[\left(\frac{b_1}{b_2}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)\right]^2} \right) - 1 - \frac{1}{\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} - \frac{1}{\left[\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)\right]^2} \right] \right\} + \frac{78h}{25Et b_1 \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \quad 1.3$$

$$f_{26} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h^2}{2b_1 \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \right\} \quad 1.4$$

$$f_{66} = \frac{12}{Et^3} \left\{ \frac{h}{b_1 \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right) \right\} \quad 1.5$$

$$F_u = V_{ADAS} = n \left(\frac{\sigma_y (b_1 - b_2) t^2}{2h} \right) \quad 1.6$$

donde:

n : Número de placas en forma de reloj de arena que forman parte del dispositivo ADAS

b_1 : Ancho de las placas en sus extremos

b_2 : Ancho de la garganta de las placas

t : Espesor de cada placa

h : Altura de las placas

E : Módulo de elasticidad del acero con que se fabrican las placas de los dispositivos ADAS (acero A-36)

$\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$: Esfuerzo de fluencia para acero tipo A-36

De acuerdo con un análisis de regresión realizado con datos de la geometría real de los ADAS, el mejor ajuste se obtiene cuando $b_1 = 0.60h$ y $b_2 = 0.10h$.

Alternativamente, la rigidez elástica inicial del dispositivo ADAS (K_{DDE}) dispuesto en un contraviento Chevron y la capacidad última a cortante de un dispositivo ADAS (F_u) se puede estimar con una aproximación presentada por Whittaker y colaboradores en 1989, y que está dada por (Tena 2000):

$$K_{DDE} = K_{ADAS} = n \left\{ \frac{2}{3} E b_{1eq} \left(\frac{t}{h} \right)^3 \right\} \quad 1.7$$

$$F_u = V_{ADAS} = n \left\{ \frac{\sigma_y b_{1eq} t^2}{2h} \right\} \quad 1.8$$

donde:

$b_{1eq} = \frac{h}{2}$: Es el ancho equivalente de las placas en sus extremos

1.4.2. Dispositivo TADAS

La variante más conocida del dispositivo ADAS es la denominada como dispositivo TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness, figura 1.9). Es un dispositivo compuesto por un conjunto de placas de acero paralelas, de espesor constante y sección transversal en forma de V, desarrollado en Taiwán por Tsai y colaboradores a principios de los años noventa. (Sadek 1996)

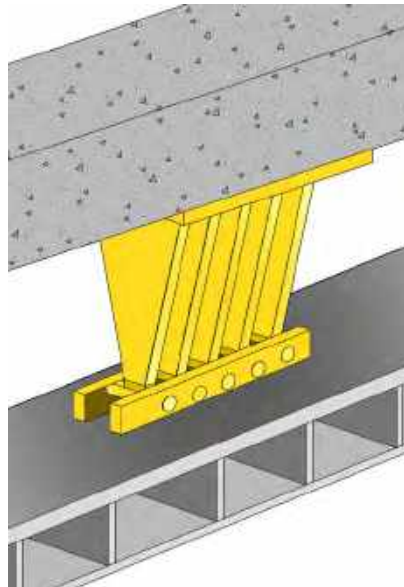


Figura 1.9. Dispositivo TADAS

1.4.2.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales

Durante las pruebas realizadas por Tsai y colaboradores en 1993, a los dispositivos llamados TADAS, en los cuales las placas se empotran en uno de sus lados a otra placa de acero que se conecta al nivel superior del entrepiso (figura 1.10). En el vértice del triángulo se colocan pernos que se conectan a contravientos que parten del nivel inferior del entrepiso. Este tipo de conexión ocasiona que las placas se deformen en curvatura simple (figura 1.10). Los dispositivos exhibieron un buen desempeño y estabilidad ante grandes cargas axiales (Jara 1994 y Sadek 1996).

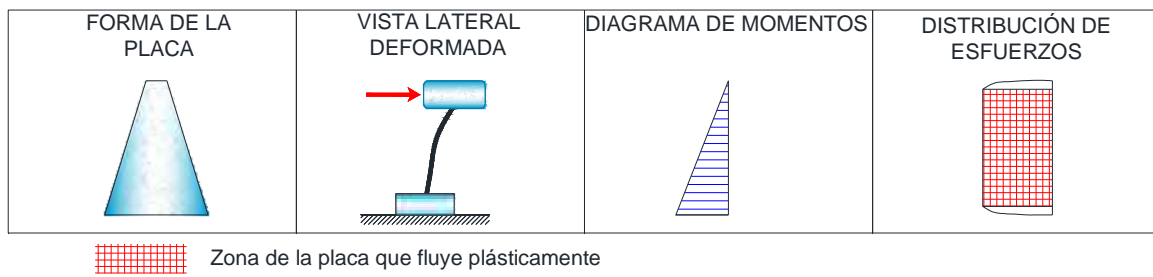


Figura 1.10. Dispositivo TADAS

1.4.2.2. Modelado y análisis

De acuerdo con el modelo propuesto por Tsai *et al.* K_{DDE} es la rigidez elástica inicial del dispositivo TADAS dispuesto en un contraviento Chevron que está dada por (Tena 2000):

$$K_{DDE} = K_{TADAS} = n \left\{ \frac{1}{6} E b \left(\frac{t}{h} \right)^3 \right\} \quad 1.9$$

El cortante de fluencia y el cortante último de un dispositivo TADAS están dados por (Tena 2000):

$$V_y^{TADAS} = n \left(\frac{\sigma_y(b)t^2}{6h} \right) \quad 1.10$$

$$F_u = V_{TADAS} = n \left(\frac{\sigma_y(b)t^2}{4h} \right) \quad 1.11$$

El desplazamiento de fluencia de los dispositivos está definido por:

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h}{E t} \quad 1.12$$

donde:

n : Número de placas triangulares que forman parte del dispositivo TADAS

b : Ancho de las placas en sus extremos

t : Espesor de cada placa

h : Altura de las placas

E : Módulo de elasticidad del acero con que se fabrican las placas de los dispositivos ADAS (acero A-36)

$\sigma_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$: Esfuerzo de fluencia para acero tipo A-36

1.4.3. Dispositivo Solera

Los dispositivos tipo solera consisten en dos placas en forma de U que disipan energía por el efecto de rolado por flexión al desplazarse una cara con respecto a la otra, similar al movimiento de las cadenas de la oruga de un tractor (figura 1.11). Los dispositivos que se estudiaron en 1989 en el instituto de ingeniería de la UNAM por Aguirre, Sánchez y González Alcorta son una variante del dispositivo U propuesto inicialmente por Kelly (Tena 2003 y Jara 1994).

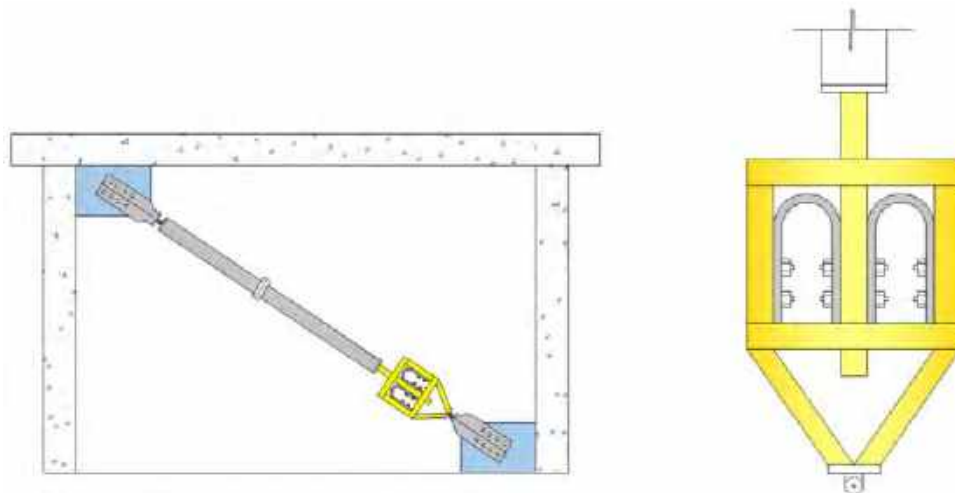


Figura 1.11. Dispositivo Solera, (Adaptado de González 1990)

1.4.3.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales

Las pruebas llevadas a cabo por Aguirre y Sánchez a finales de los años ochenta demostraron que el comportamiento histéretico es muy estable y por la manera en que se deforman alcanzan la fluencia en casi toda la sección transversal al mismo tiempo (figura 1.12). El número de ciclos de carga y descarga que soportan depende de la amplitud de deformación (Jara 1994).

Estudios de Gómez y colaboradores del análisis paramétrico de un sistema de un grado de libertad con disipadores de energía y demandas de ductilidad de dos y cuatro, mostraron que el intervalo de aplicación de este sistema en la zona blanda de la Ciudad de México, se limita a periodos de las estructuras inferiores a 1.6 s (Jara 1994).

En la figura 1.12 se describe a criterio del autor, el comportamiento de la placas que conforman el dispositivo solera, donde el rolado de las placas provoca deformaciones a lo largo de toda la seccion (comprimiendo una cara de la placa y tensionando la otra cara).

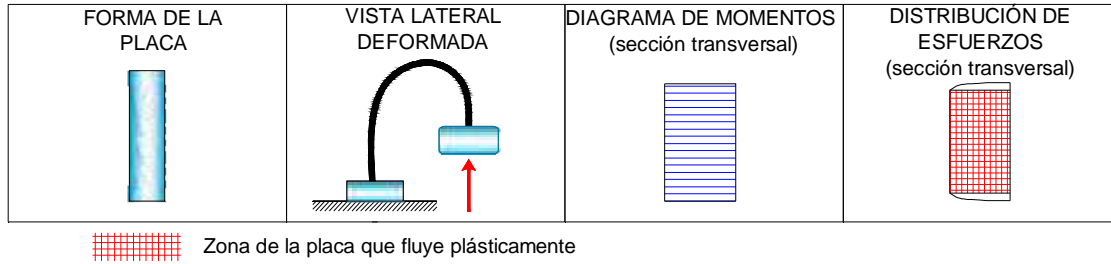


Figura 1.12. Dispositivo Solera

1.4.3.2. Modelado y análisis

De acuerdo con el modelo histerético general propuesto por Aguirre y Sánchez con base en sus ensayos experimentales, la curva primaria de cualquier dispositivo solera estaría dada por las siguientes expresiones (Tena 2000):

$$K_{DDE} = K_{DS} = 4.24 \frac{F_u}{e} \quad 1.13$$

$$K_2 = 0.134 \frac{F_u}{e} = 0.032 K_{DS} \quad 1.14$$

$$F_u = F_{uDS} = \frac{Mp}{R} = \frac{\sigma_u b e^2}{4R} \quad 1.15$$

$$\Delta_y = \frac{\sigma_y h}{Et} \quad 1.16$$

$$\Delta_u = \frac{\sigma_y h}{Et} \quad 1.17$$

$$F_y = 0.756 F_{uDS} \quad 1.18$$

De acuerdo con el estudio de Aguirre y Sánchez, para que un elemento solera sea capaz de resistir 100 ciclos al desplazamiento máximo $\Delta_u = 2e$ se debe cumplir que (Tena 2000):

$$R = 3.57e \quad 1.19$$

Por lo que en este caso la rigidez elástica inicial y la capacidad última del dispositivo solera se puede estimar como (Tena 2000):

$$K_{DDE} = K_{DS} = n(0.297 \sigma_u b) \quad 1.20$$

$$F_u = F_{uDS} = n(0.07)\sigma_u b(e) \quad 1.21$$

donde:

- σ_u : Esfuerzo último del acero con que se hace la solera
- b : Ancho de cada solera
- R : Radio medio de la curvatura de la solera
- e : Espesor de la solera
- K_2 : Rigidez posterior a la fluencia del dispositivo solera
- F_y : Fuerza de fluencia del dispositivo solera
- F_u : Capacidad última del dispositivo solera
- Δ_y : Desplazamiento de fluencia del dispositivo solera
- Δ_u : Desplazamiento último del dispositivo solera

De acuerdo con los estudios de Aguirre y Sánchez, se recomienda utilizar soleras cuyo ancho sea tres veces su espesor $b = 3e$ y con un esfuerzo último $\sigma_u = 4200 \text{ kg/cm}^2$ (Tena 2000).

1.4.4. Dispositivo BRB (contraviento restringido contra pandeo)

El dispositivo BRB (Buckling-Restrained Brace, figura 1.13) consiste en una barra de acero (usualmente de acero de bajo esfuerzo de fluencia), cuya sección transversal puede ser de distintas formas y se encuentra rodeada por una camisa de acero (regularmente un tubo de acero rectangular). La región entre la camisa de acero y la barra es ocupada con un material de relleno, que puede ser concreto o mortero, un revestimiento especial se aplica al contraviento para prevenir la unión mecánica con el material de relleno (se hace con el fin de evitar que la resistencia a compresión de la barra sea significativamente mayor que su resistencia a tensión), en consecuencia, la barra de acero puede deslizarse con respecto al material de relleno. El confinamiento previsto por la camisa de acero y el material de relleno permite al contraviento estar sujeto a cargas de compresión sin que se pandee por efectos de esbeltez. De esta manera, únicamente el núcleo de acero se encarga de tomar las cargas de tensión y compresión.

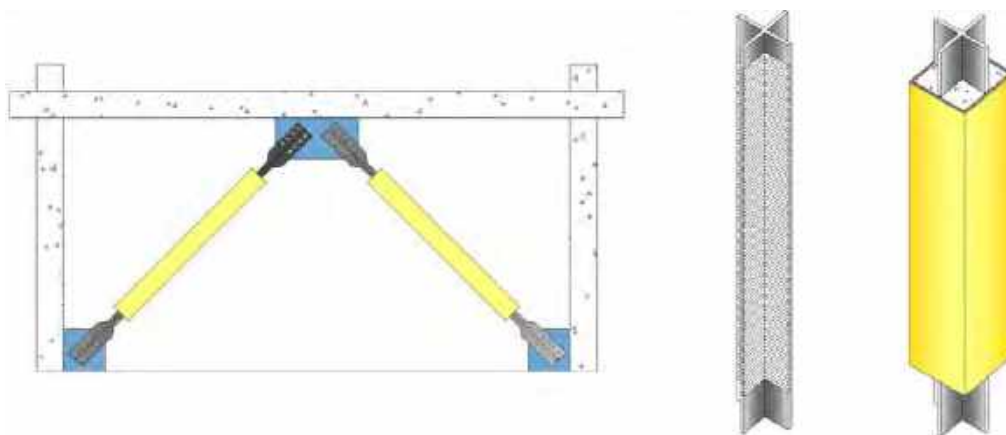


Figura 1.13. Dispositivo BRB

1.4.4.1. Descripción del comportamiento con base en estudios experimentales

Se han llevado a cabo un importante número de pruebas uniaxiales de una gran variedad de contravientos restringidos contra el pandeo, la mayoría de los contravientos tienen derechos de patente. En general, los resultados muestran un comportamiento histerético estable con una excelente resistencia a la fatiga ante ciclos de carga de baja intensidad. La resistencia a compresión usualmente es un poco mayor que la resistencia a tensión, esto debido al efecto del confinamiento a compresión (Uang y Nakashima 2003).

1.4.4.2. Modelado y análisis

La rigidez lateral que aporta un contraviento a un entrepiso dado se relaciona con el área del núcleo por medio de la siguiente relación dada por Tremblay y colaboradores (Terán y Virto 2009).

$$\frac{K_L}{(A/L)} = \frac{E \cos^2 \theta}{\gamma + \eta(1-\gamma)} \quad 1.22$$

En cuanto a la distorsión de entrepiso en la que se presenta la fluencia de un contraviento, puede establecerse lo siguiente (Terán y Virto 2009):

$$\left(\frac{\Delta_L}{h}\right)_y = \frac{f_y[\gamma + \eta(1-\gamma)]}{E \sin \theta \cos \theta} \quad 1.23$$

Finalmente, es posible establecer una relación entre el área del núcleo y el cortante lateral conque contribuye el contraviento al cortante lateral de entrepiso (Terán y Virto 2009):

$$V_L = A f_y \cos \theta \quad 1.24$$

donde:

K_L : Rigidez lateral que aporta un contraviento

A : Área del núcleo

E : Módulo de elasticidad del núcleo

θ : Ángulo de inclinación

L : Longitud total del contraviento

L_c : Longitud del núcleo del contraviento

γ : Cociente entre la longitud del núcleo del contraviento y L

η : Cociente entre los esfuerzos axiales promedio fuera del núcleo y el núcleo del contraviento

Δ_L : Desplazamiento lateral relativo

h : Altura de entrepiso

f_y : Esfuerzo de fluencia del contraviento

V_L : Cortante lateral

1.5. Estado del arte en aplicaciones de disipadores de energía por histéresis del material en estructuras existentes de concreto reforzado.

1.5.1. México (reparación y diseño original)

Reestructuración del Edificio Izazaga 38-40 en el D.F., el edificio de doce niveles, estructurado con base en marcos de concreto no dúctiles y algunos muros estructurales de concreto reforzado y de muros diafragma de mampostería no reforzada, originalmente construido en la década de los setenta, y dañado por el sismo de Michoacán 1985, se reestructuró con dispositivos ADAS conforme al proyecto del M. en C. Enrique Martínez Romero (Tena 2003).

Reestructuración del Hospital de Cardiología del Centro Médico Siglo XXI en el Distrito Federal. El edificio de cinco niveles, fue estructurado originalmente con base en marcos de concreto no dúctiles y construido en los años setenta. Se reestructuró colocando dispositivos ADAS montados sobre contrafuertes tipo armadura, conforme al proyecto del M. en C. Enrique Martínez Romero (Tena 2003).



Figura 1.14. Hospital de Cardiología, Dispositivos ADAS (Tena 2008)

Reestructuración del Complejo de Oficinas Centrales del IMSS en el Distrito Federal. El complejo está formado por tres edificios de doce niveles, estructurado originalmente con base en marcos de concreto no dúctiles, construidos en la década de los cuarenta. Aunque no sufrió aparentemente daños de importancia durante el sismo de Michoacán de 1985, dado que es una estructura del grupo B1, se emplearon dispositivos ADAS para su reestructuración conforme al proyecto del M. en C. Enrique Martínez Romero, para satisfacer los requisitos del RCDF-87 (Tena 2003).



Figura 1.15. Complejo de Oficinas Centrales del IMSS, Dispositivos ADAS (Tena 2008)

Reestructuración del Edificio Torre Monterrey en el Distrito Federal. El edificio de 13 niveles más un sótano fue estructurado con base en marcos de concreto reforzado, y reestructurado con dispositivos, conforme al proyecto del M. en C. Enrique Martínez Romero (Tena 2003).



Figura 1.16. Torre Monterrey, Dispositivos ADAS (Tena 2008)

Diseño original de los departamentos “Mar Azul” de 28 niveles localizado en Acapulco, con dispositivos ADAS (Tena 2008).



Figura 1.17. Mar azul, Dispositivos ADAS (Tena 2008)

1.5.2. Ámbito mundial (Reparación y diseño original)

Reestructuración de una sucursal del Banco Wells Fargo en San Francisco, California. El edificio de dos niveles, estructurado con base en marcos de concreto no dúctiles, fue originalmente construido en 1967 y dañado por el sismo de 1989 de Loma Prieta. Fueron empleados un total de siete dispositivos ADAS, cada uno con una fuerza de fluencia de 150 Kips (Soong y Spencer 2002).

Reestructuración del edificio federal Wallace F. Bennett, Salt Lake City, Utah. El edificio de ocho niveles, estructurado con base en marcos de concreto no dúctiles, fue originalmente construido a principios de los años sesenta, el edificio se encuentra próximo a la falla Wasatch y se esperaba que no tuviera un buen comportamiento ante un evento de mediana o gran magnitud que tuviera como fuente la falla mencionada según Brown et al. El diseño final consiste de 344 tendones desadheridos teniendo fuerzas de fluencia en el rango de los 917 a 8477 kN. El proyecto de reestructuración fue completado en el año 2001 (Symans 2008).

Los dispositivos BRB (Buckling-Restrained Brace), son ampliamente usados en el continente asiático. Algunos proyectos interesantes son; en Osaka, Japón, se construyó la torre Raguza de 26 niveles, en Tokyo, Japón se encuentran el complejo Harumi 1 Chome y el complejo Passage Garden (Xie 2004).

CAPÍTULO II

REGLAMENTACIONES Y PROPUESTAS DE REGLAMENTACIÓN EXISTENTES

2.1. Introducción

La innovación de nuevos sistemas para mejorar la sismorresistencia de las edificaciones ha conducido al desarrollo de nuevos métodos de análisis y diseño, no obstante las necesidades y los recursos de los que dispone cada país son distintos. En la actualidad existen diversas reglamentaciones, directrices, recomendaciones, consideraciones, etc., desarrolladas principalmente por los EUA y Japón, para la concepción, diseño y construcción de estructuras con disipadores de energía (Symans *et al.* 2008). Sin embargo, cada zona sísmica tiene distintas características en términos de movimientos sísmicos, por consiguiente, exige de manera distinta a las estructuras. Por eso es muy importante adaptar correctamente los principios físicos y los resultados experimentales que describen el comportamiento de estos sistemas, tanto a nivel sistema disipador, como a nivel sistema estructural.

2.2. Reglamentación existente en el ámbito internacional para el diseño de marcos dúctiles de concreto con disipadores de energía por histéresis

Según Whittaker y colaboradores, las directrices para la implantación de dispositivos disipadores de energía en edificios nuevos fueron propuestas por la Asociación de Ingenieros Estructurales del Norte de California (Structural Engineers Association of Northern California, SEAONC, por su acrónimo en inglés) para proveer de directrices a los ingenieros estructurales, funcionarios de construcción, y peritos, quienes estaban encargados de la implantación de este tipo de dispositivos en las estructuras de los edificios (Symans *et al.* 2008).

Según Kircher, a mediados de la década de los noventa, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA, por sus siglas en inglés) financió el desarrollo de directrices para la rehabilitación sismorresistente de edificios (Symans *et al.* 2008). Se presentaron cuatro métodos nuevos de evaluación y análisis sísmico en el Programa Nacional de Reducción del Peligro Sísmico (en inglés: National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP). El documento fue nombrado “directrices para la rehabilitación sísmica de edificios” (guidelines for the seismic rehabilitation of buildings), las cuales fueron publicadas en el reporte FEMA 273 y 274. Los métodos fueron:

- Análisis estático lineal
- Análisis dinámico lineal
- Análisis estático no lineal
- Análisis dinámico no lineal

Los cuatro métodos presentados están basados directamente o indirectamente en desplazamientos, haciendo uso de información relacionada con los desplazamientos para la revisión de los componentes (de tal manera que los procedimientos del FEMA 273 y 274 representan un cambio en el paradigma del diseño sísmico de la práctica, porque el enfoque de análisis, diseño y evaluación cambió de fuerzas a deformaciones). Las acciones en los componentes de un edificio de marcos, también fueron caracterizadas como (Symans *et al.* 2008): a) controladas por deformación (por acciones dúctiles, tales como, los momentos flexionantes en las vigas) o, b) controladas por fuerza (por acciones frágiles, tales como, las fuerzas cortantes en las columnas).

En 1997, el subcomité técnico 12 (Technical Subcommittee 12, TS-12) del Consejo de Seguridad Sísmica en Edificios de FEMA fue asignado en el desarrollo de procedimientos para el análisis, diseño y pruebas de sistemas y dispositivos disipadores para su inclusión en el *NEHRP*, el cual se publicó con el nombre de “consideraciones recomendadas para reglamentaciones sísmicas de edificios nuevos y otras estructuras” (recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures).

El trabajo del TS-12 se plasmó en un capítulo titulado “Estructuras con sistemas de amortiguamiento” (structures with damping systems), que se adicionó en el año 2003 al *NEHRP Recommended Provisions*. Recientemente, el documento fue reformateado e incluido en la edición del año 2005 del ASCE/SIE7-05 Standard, con el título de “cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras” (Minimum design loads for buildings and other structures). En el año 2006 el Código Internacional de Edificios (International Building Code, IBC 2006, por sus siglas en inglés) y el Código de Seguridad y Construcción de Edificios (Building Construction and Safety Code 2006, BCSC 2006), lo adoptaron como referencia.

2.3. Propuestas de reglamentación existentes para el diseño de marcos dúctiles de concreto con disipadores de energía por histéresis en México

Actualmente, en México no existen un reglamento, código o norma que gobierne el análisis y diseño de estructuras con disipadores de energía. Asimismo, las disposiciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2004 (NTCC 2004) no incluyen reglas para el diseño y revisión de nudos a los cuales llegan contravientos.

Es notoria la ausencia de recomendaciones reglamentarias específicas de diseño que garanticen el comportamiento dúctil de estos sistemas estructurales, por lo que no se puede garantizar el mecanismo de falla esperado columna fuerte-viga débil-sistema disipador más débil.

Sin embargo, existen diversas propuestas novedosas de investigadores para la concepción y el diseño de edificios con disipadores de energía por histéresis del material. A continuación se presenta algunas de las propuestas más importantes.

2.3.1. Reglamentos de diseño sísmico vigentes

Tena (2014) propone un diseño basado en el Capítulo 5 de las NTCS 2004, el cual se calibró inicialmente para marcos no dúctiles de concreto reforzado con dispositivos histeréticos (Nanguilasmú y Tena 2013). El siguiente texto es una adaptación basada en su totalidad en las notas de clase del Dr. Arturo Tena Colunga (Tena 2014).

1. Predimensionar a los elementos estructurales convencionales para resistir las cargas gravitacionales conforme al reglamento. Con este se calcula las propiedades dinámicas de la estructura competente a cargas gravitacionales.
2. Seleccionar el espectro de diseño a utilizar de acuerdo con la ubicación de la estructura y el tipo de suelo donde se desplante.
3. Definir el factor de comportamiento sísmico Q y el factor reductivo de fuerzas sísmicas con fines de diseño (Q') de acuerdo con el sistema estructural seleccionado.
4. Una vez definidas las consideraciones generales de diseño, se debe seleccionar el tipo de análisis, se sugiere utilizar para fines de diseño, un análisis dinámico modal, pero puede emplearse el método de análisis estático si la primera opción no es viable. Ambos métodos de análisis deben satisfacer los lineamientos del reglamento en cuestión y sus NTCS 2004.
5. Toda vez definidas las acciones de diseño y el método de análisis, se puede elaborar el modelo elástico equivalente de la estructura, con el que se calcula el periodo elástico inicial. Se recomienda utilizar un modelo tridimensional.
6. El diseño de este tipo de estructuras, al igual que muchas otras, involucra un proceso iterativo, donde se proponen secciones y se verifican estas hasta que el diseño final satisfaga todos los lineamientos del Reglamento y de sus normas técnicas complementarias en cuanto a estados límites de servicio, de deformación y de resistencia.

2.3.2. Recomendaciones de diseño por desempeño

Ruiz (2002) da algunas recomendaciones sobre el diseño sísmico del refuerzo de edificios con disipadores de energía pasivos cuyas relaciones carga-deformación no dependen de la velocidad ni de la frecuencia de la excitación, sino de desplazamiento relativo que ocurre en los extremos de los disipadores. El siguiente texto es una adaptación sintetizada basada en su totalidad en el trabajo presentado por Ruiz (2002):

1. Especificar los niveles de peligro sísmico. Se propone que los espectros de diseño correspondan a tasas de falla uniforme, que sean en lo posible compatibles con los del Apéndice A de las NTCS 2004, pero tomando además en cuenta la influencia del comportamiento no lineal de los disipadores (representando explícitamente el comportamiento de los disipadores mediante curvas histeréticas o mediante un amortiguamiento efectivo).
2. Dependiendo del nivel de seguridad requerido para la estructura que se trate, se asocia a cada nivel de peligro sísmico un nivel de desempeño estructural deseable. Se propone utilizar la clasificación de construcciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 2004 (RCDF 2004), y multiplicar los estados límite por un factor de 1.5 para estructuras del Grupo A.
3. Especificar los niveles de desempeño (o estados límite) de interés. Se considera que los edificios con disipadores deberán tener los mismos límites de servicio tolerables de distorsión máximas de entrepiso que los edificios convencionales; dichos límites se especifican en el Apéndice de las NTCS 2004. En cuanto a los límites de falla, se proponen: a) demanda de ductilidad global que es capaz de desarrollar la estructura con disipadores, b) distorsión máxima tolerable de entrepiso y, c) demanda de ductilidad que es capaz de desarrollar el sistema disipador.

Torres y Ruiz (2004) proponen un algoritmo de diseño basado en demandas sísmicas probabilistas para edificios rehabilitados con dispositivos disipadores de energía histeréticos. El algoritmo básicamente provee de la rigidez, resistencia y distribución de los disipadores de energía en la altura del edificio para los objetivos de desplazamiento. Los parámetros necesarios para la aplicación del método son: a) distorsión máxima de entrepiso que puede desarrollar el edificio en rehabilitación y, b) máxima ductilidad demandada por los dispositivos histeréticos.

El siguiente texto es una adaptación sintetizada basada en su totalidad en el trabajo presentado por Torres y Ruiz (2002). El algoritmo propuesto utiliza un análisis dinámico no lineal de un Sistema de un Grado de Libertad (S1GL) con Dispositivos Disipadores de Energía (DDE) conectados en paralelo, equivalente al edificio. El sistema completo se excita con registros sísmicos escalados para obtener las curvas de peligro sísmico, que corresponden a distintos niveles de rigidez y resistencia, que a su vez están asociados a distintas soluciones de rehabilitación. Para la evaluación de las curvas de riesgo sísmico recomiendan el uso de la aproximación directa simplificada propuesta por Cornell. En seguida, un patrón de refuerzo preliminar es seleccionado tal que las respuestas de distorsión máxima de entrepiso y máxima ductilidad demandada por los dispositivos histeréticos describan tasas anuales medias o excedentes. A continuación se propone una distribución espacial preliminar de los DDE para un

sistema de múltiples grados de libertad. La distribución final de los DDE se encuentra después de una o dos iteraciones.

Esteva, Ruiz y Rivera (2005) proponen un diseño sísmico basado en desempeño y confiabilidad para estructuras con dispositivos disipadores de energía. El siguiente texto es una adaptación sintetizada basada en su totalidad en el trabajo presentado por Esteva, Ruiz y Rivera (2005). Se formulan criterios basados en confiabilidad para aplicarlos a sistemas con dispositivos disipadores de energía. También se formulan nuevos indicadores que caracterizan las propiedades mecánicas globales del sistema combinado, así como para las nuevas variables de control que son usadas para especificar las condiciones de diseño aceptables para movimientos sísmicos correspondientes a periodos de retorno establecidos. Se estudian las relaciones entre los valores objetivo de las tasas de falla anual y los niveles de confiabilidad para sismos asociados con los periodos de retorno necesarios para cumplir con los valores objetivos, con el fin de proporcionar herramientas para determinar las propiedades mecánicas requeridas de todos los miembros que deberían conducir a las tasas de falla especificadas para el sistema en conjunto.

Terán y Virto (2009) proponen un método de diseño basado en desplazamientos de edificaciones bajas rigidizadas con contravientos desadheridos. Esta metodología se basa en el control del desplazamiento lateral para el diseño por desempeño de un sistema de contravientos desadheridos y la estructura que los recibe (Terán y Virto 2009). El siguiente texto es una adaptación basada en su totalidad en el trabajo presentado por Terán y Virto (2009):

1. Establecer una definición cualitativa del comportamiento deseado de la estructura. Esto se hace a través de la consideración explícita de los niveles de daño aceptable según los estados límite bajo consideración.
2. Cuantificación del comportamiento deseado a través de establecer umbrales de respuesta global para la estructura con la ayuda de índices de daño.
3. Establecer el valor de las características mecánicas de la estructura a nivel global a través de definir, con la ayuda de espectros de resistencia y de desplazamiento, el valor de dos parámetros globales de diseño: el cortante basal, que cuantifica la resistencia lateral de diseño; y el periodo fundamental de vibración; que cuantifica los requerimientos de diseño de rigidez lateral. El dimensionado de los contravientos desadheridos se lleva a cabo con base en los valores establecidos para estos dos parámetros. Note que la metodología propuesta no maneja explícitamente la capacidad de deformación última del sistema de contravientos. Al respecto, se hace notar que mientras que las pruebas experimentales sugieren que un contraviento desadherido bien detallado es capaz de alcanzar deformaciones últimas muy elevadas la metodología propuesta limita de manera importante la demanda de distorsión en el edificio para proteger al sistema gravitacional y a los elementos no estructurales. Bajo estas circunstancias, la capacidad de deformación de los contravientos no rige el diseño.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE DISEÑO SÍSMICO PARA MARCOS DÚCTILES DE CONCRETO CON DISIPADORES HISTERÉTICOS UTILIZANDO CRITERIOS DE DISEÑO POR CAPACIDAD

3.1. Introducción

La innovación en la ingeniería sísmica puede entenderse a partir del planteamiento de sistemas estructurales novedosos que puedan controlar adecuada y eficientemente el nivel de daño. Estas propuestas impactan en la manera que concebimos, diseñamos y construimos edificios.

En este capítulo se explicará la metodología de diseño desarrollada, para concebir una estructura a base de marcos dúctiles de concreto, y adicionada con dispositivos histeréticos, utilizando criterios de diseño por capacidad.

3.2. Modelos y casos de estudio

El planteamiento de los modelos y casos de estudio está basado en una adaptación de los trabajos presentados por Nangullasmú (2011) y por Godínez y Tena (2011).

Hipótesis:

- El objetivo principal del sistema total es resistir sin colapso, aunque con algún tipo de daño, concentrado en elementos especialmente diseñados para disipar energía (ductilidad).
- El sistema gravitacional es competente para resistir cargas verticales, además de las fuerzas sísmicas de diseño.
- El sistema de contraventeo que servirá de soporte a los disipadores de energía, se comportará elásticamente.
- Los dispositivos histeréticos absorberán la mayor cantidad de comportamiento no lineal (daño), ante cargas laterales.
- El sistema de piso transmite las cargas inerciales y estáticas de manera consistente al sistema gravitacional y al sistema disipador.

3.2.1. Selección de la configuración estructural y número de los niveles de los marcos en estudio

Los marcos analizados corresponden a una estructura regular tridimensional con uso supuesto para albergar oficinas. El edificio cuenta con una planta rectangular de 24 m de ancho (dirección Y) y 32 m de largo (dirección X) en la que los marcos periféricos se encuentran contraventeados en sus crujías exteriores. El edificio cuenta con cuatro crujías en la dirección X y tres en la dirección Y. los claros miden 8m. En ambas direcciones existen vigas secundarias situadas en la mitad de cada claro, dividiendo el tablero de losa delimitado por las vigas primarias en cuatro áreas, para los modelos de estudio el ángulo de inclinación de los contravientos es de 45° con respecto a la horizontal, Fig. 3.1.

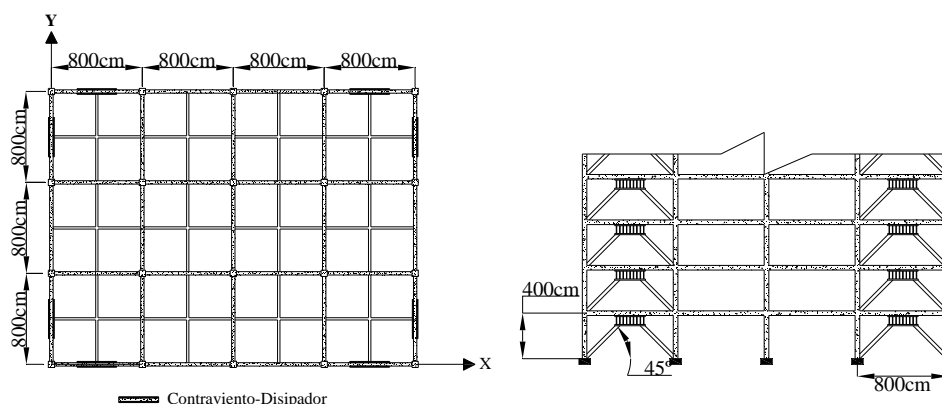


Figura 3.1. Elevación y planta de la configuración estructural de los modelos

Los modelos estudiados tienen 5, 10, 15, 20 y 25 niveles, las alturas de entrepiso son de 4m. Por lo tanto, las alturas totales son de 20, 40, 60, 80 y 100 m, respectivamente. Las relaciones de esbeltez (H/L) para la dirección de estudio (dirección X), corresponden a 0.625, 1.25, 1.875, 2.5 y 3.125, respectivamente (Fig. 3.2. y Tabla 3.1). Los cambios de sección propuestos para los diferentes niveles se resumen en la Tabla 3.2 y se muestran gráficamente en la Fig. 3.2.

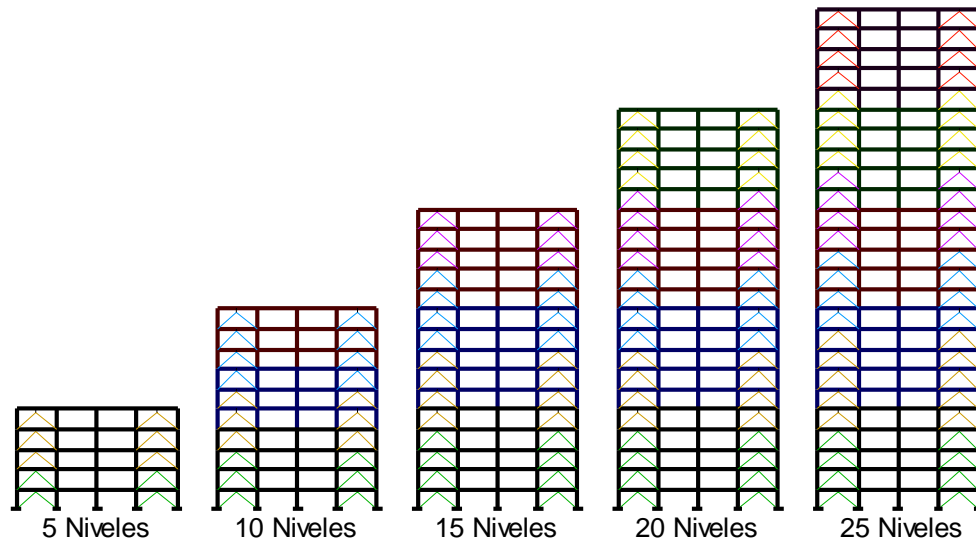


Figura 3.2. Niveles y cambios de sección para los modelos de estudio

Niveles	Sistema Gravitacional	Sistema Disipador
5	1-5	1-2
		3-5
10	1-4	1-3
	5-7	4-6
	8-10	7-10
15	1-5	1-4
	6-10	5-8
	11-15	9-12
		13-15
20	1-5	1-4
	6-10	5-8
	11-15	9-12
	16-20	13-16
		17-20
25	1-5	1-4
	6-10	5-9
	11-15	10-13
	16-20	14-17
	21-25	18-21
		22-25

Tabla 3.1. Cambios de sección de los sistemas gravitacional y disipador

Niveles	Altura (m)	H/L
5	20	0.625
10	40	1.250
15	60	1.875
20	80	2.500
25	100	3.125

Tabla 3.2. Relaciones de esbeltez

3.2.2. Selección de los parámetros α y β , con base en las relaciones de rigidez propuestas

El sistema estructural total (ST) puede ser dividido en un marco de concreto con detallado dúctil (Sistema Gravitacional, SG) y los dispositivos disipadores de energía montados sobre contravientos tipo chevron (Sistema Disipador, SD, Fig. 3.3). Para monitorear y cuantificar el aporte de estos dos sistemas de manera individual a la respuesta global de la estructura, se modelan, diseñan y cuantifican de manera independiente. Teniendo en consideración que estos dos sistemas pueden oponerse en diferente proporción al desplazamiento ante deformaciones laterales (relación de rigidez lateral, $\alpha = K_{SG}/K_{ST}$), en este trabajo se presentan tres casos de estudio los cuales se describen a continuación.

CASO I ($\alpha = 0.75$): Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total.

CASO II ($\alpha = 0.5$): Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total.

CASO III ($\alpha = 0.25$): Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total.



Figura 3.3. Sistema total, sistema gravitacional y sistema disipador

El sistema disipador se puede dividir en dos subsistemas, el dispositivo histerético (Dispositivo Histerético, DH) y el contraviento tipo chevron (Sistema de Contraviento, SC). El disipador histerético trabaja inelásticamente con base en una deformación plástica estable y controlada,

mientras que el sistema de contraventeo funciona básicamente como un elemento de soporte, el cual se pretende siempre permanezca elástico en toda su sección y longitud, y que además transforma las fuerzas que le transmite el dissipador hysterético en fuerzas axiales que transmite a las columnas. Teniendo en consideración que estos dos subsistemas aportan una rigidez lateral que puede ser modelada como un resorte en serie, estos dos subsistemas también tienen una proporción que los relaciona entre ellos ($\beta = K_{DH}/K_{SC}$), la cual podemos modelar y cuantificar con cierta precisión. En este trabajo se presentan cuatro casos de estudio, los cuales se describen a continuación.

CASO A ($\beta = 1.0$): Cuando el sistema de contraventeo aporta la misma rigidez lateral que el dispositivo hysterético.

CASO B ($\beta = 0.75$): Cuando el sistema de contraventeo aporta $1/3$ más rigidez lateral que el dispositivo hysterético.

CASO C ($\beta = 0.50$): Cuando el sistema de contraventeo aporta el doble de rigidez lateral que el dispositivo hysterético.

CASO D ($\beta = 0.25$): Cuando el sistema de contraventeo aporta el cuádruple de rigidez lateral que el dispositivo hysterético.

La pendiente de pos-fluencia (K_2) del dispositivo hysterético puede ser modelada como una fracción de la rigidez elástica, los valores utilizados en este estudio son; 0, 0.03, 0.05, que corresponde al 0, 3 y 5% de la rigidez elástica inicial. Estos valores están sustentados en trabajos experimentales.

El número total de modelos que se consideran con las diferentes combinaciones de variables (*Niveles*, α , β , K_2) es de 180 Figura 3.4.

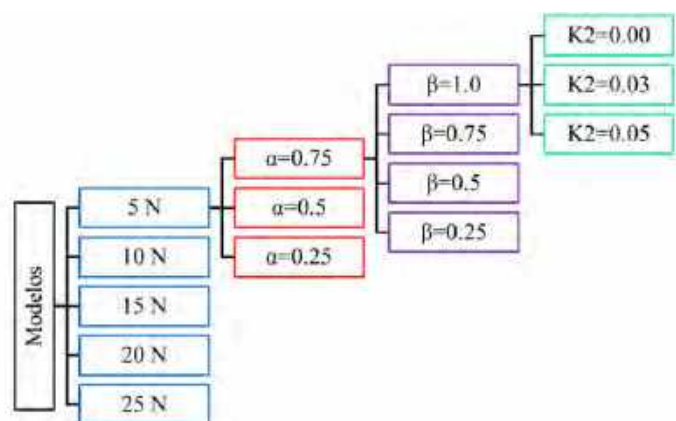


Figura 3.4. Modelos de estudio

3.3. Criterios del diseño por capacidad

El objetivo principal del diseño por capacidad es resistir sin colapso, aunque con algún tipo de daño estructural y no estructural, niveles de diseño, de movimiento sísmico. Algunas de las estrategias usadas para el diseño por capacidad son las siguientes.

- Fomentar la respuesta a flexión de los elementos que deben acomodar el comportamiento no-lineal.
- Evitar o retrasar modos de comportamiento que lleven a degradación excesiva o fallas frágiles.
- Proveer de capacidad de deformación adecuada a las zonas críticas de los elementos que deben acomodar las demandas plásticas.

Una de las premisas del diseño por capacidad consiste en reconocer que es muy difícil predecir la respuesta dinámica de una estructura, particularmente cuando esta exhibe comportamiento no-lineal de importancia. Otra premisa consiste en plantear un enfoque sistémico al diseño de la estructura. Esto implica la consideración explícita de la interacción que se da entre todos los elementos estructurales.

Conforme se incrementa la deformación del sistema estructural total, se incrementan los niveles de daño estructural. No obstante, la filosofía de diseño por capacidad fomenta que el daño sea controlado y jerarquizado (figura 3.5), de tal manera que el primer elemento débil sea el dispositivo histerético, posteriormente se dañen vigas y por último haya daño en columnas. El daño tiene que ser controlado y limitado a las zonas específicas donde se acumularán las demandas plásticas de deformación. Estas zonas deben mantener los niveles de resistencia de diseño; por tanto, la estructura siempre tiene que ser capaz de mantener su integridad.

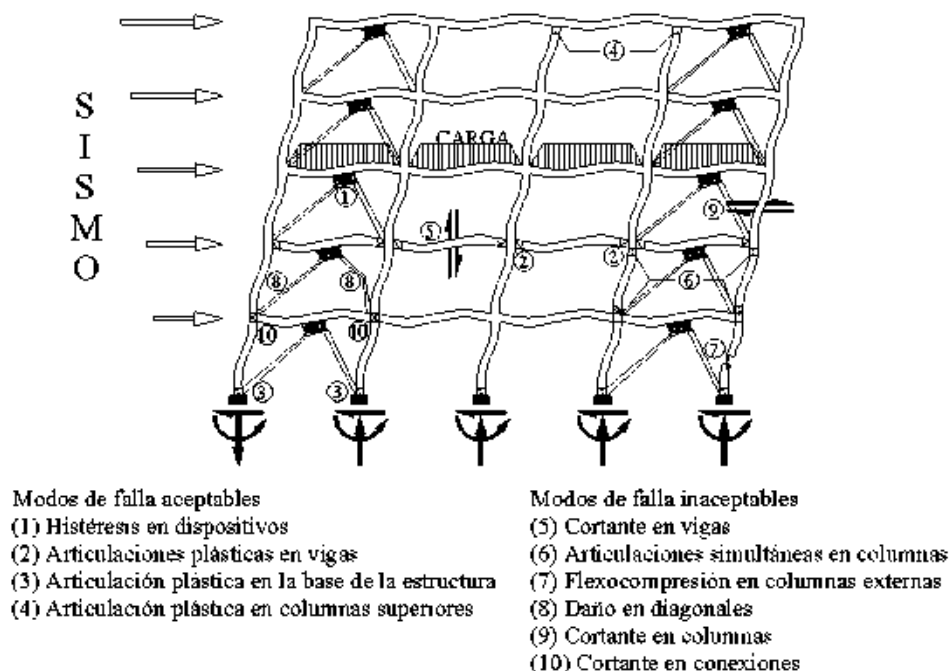


Figura 3.5. Identificación y jerarquización de modos de comportamiento y falla, (adaptada de Paulay 1996)

3.4. Objetivos de diseño

Las estructuras con sistemas disipadores (SD) se plantean objetivos de diseño diferentes a los que se plantea un sistema tradicional, por consiguiente, cambian los estados límite de diseño sísmico. La reglamentación para la concepción de estructuras tradicionales (marcos sismorresistentes), dada por las NTCS-2004 (2004), establecen como propósito obtener una seguridad adecuada tal que, bajo el sismo máximo probable, no habrá fallas estructurales mayores o pérdidas de vidas, aunque pueden presentarse daños que lleguen a afectar el funcionamiento del edificio y requerir reparaciones importantes, es decir, que el estado límite de diseño de las NTCS-2004 es el de prevención del colapso (figura 3.6). Las estructuras con sistemas disipadores deben tener como objetivo de diseño:

- a) el daño mínimo del sistema gravitacional, tal que éste no necesite reparaciones
- b) un daño severo en los dispositivos histeréticos, sin que lleguen a desconectarse

Con estas consideraciones el estado límite de diseño de la estructura provista con un sistema disipador debe corresponder al operacional (figura 3.6).

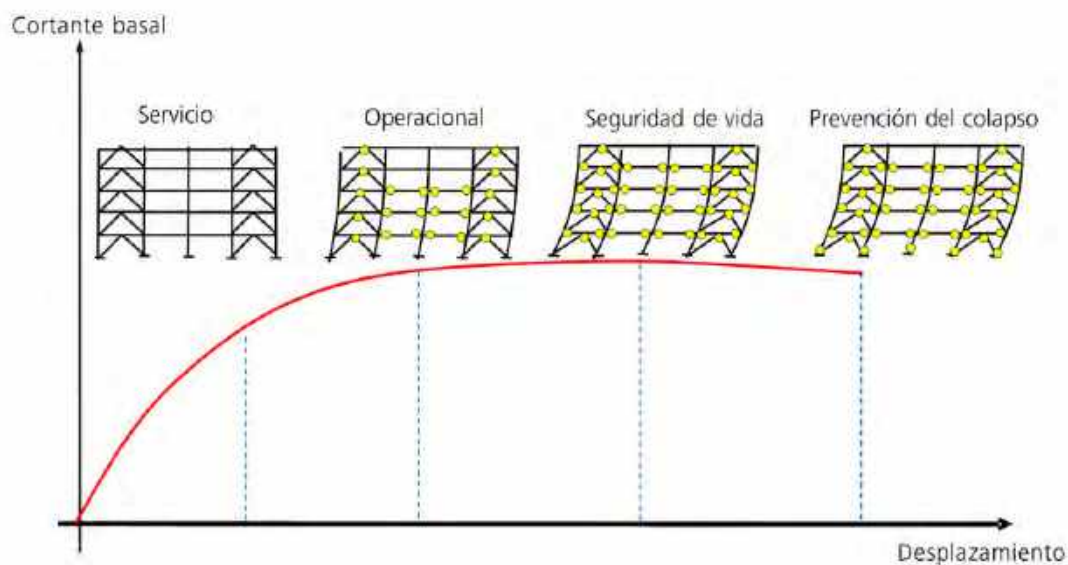


Figura 3.6. Estados límite de la curva de capacidad global, (Adaptado de Terán 2014)

El comportamiento teórico idealizado ante deformaciones laterales, del sistema total, conformado tanto del sistema gravitacional como del sistema disipador, se muestra esquemáticamente en la figura 3.7.

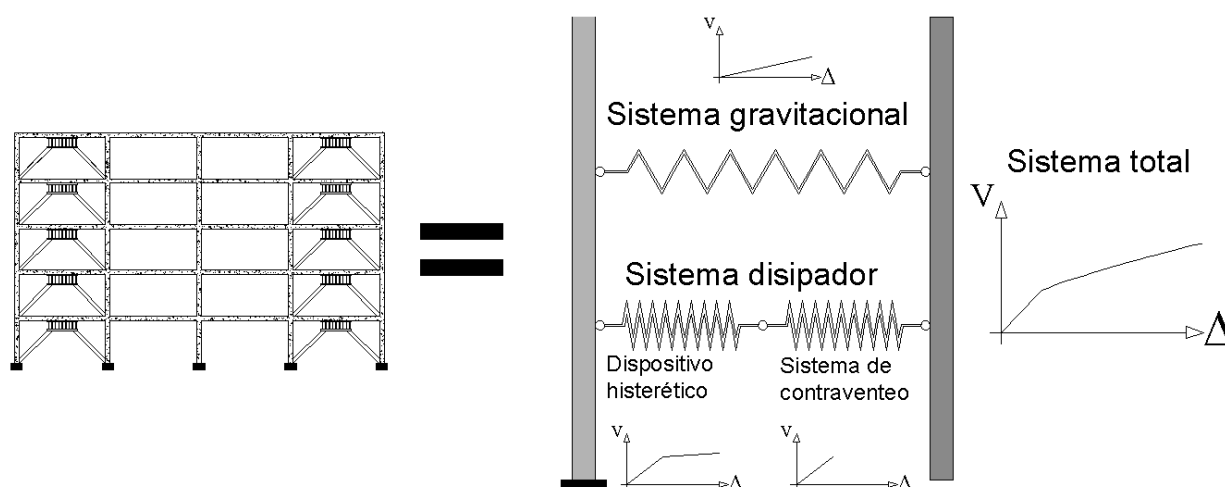


Figura 3.7. Comportamiento ideal de los sistemas, (Adaptado de Terán 2014)

3.5. Metodología para el diseño del sistema gravitacional y el sistema disipador

En la presente sección se describe el planteamiento de la metodología de diseño por deformación del sistema estructural compuesto por marcos dúctiles de concreto y disipadores histeréticos montados sobre contravientos tipo chevron, desarrollada para las relaciones de rigidez propuestas.

El sistema gravitacional de un edificio debe proporcionar una forma adecuada de transmitir las cargas al sistema suelo-cimentación, y está conformado por cuatro grupos de elementos: losas, vigas, columnas y conexiones (nudos). El sistema gravitacional en este estudio está conformado por marcos dúctiles de concreto que se proveen de un detallado dúctil que fomenta consistencia, estabilidad y control, de tal manera que ante un evento sísmico importante, pueda acomodar deformaciones importantes y, al mismo tiempo, mantener los niveles de resistencia para los cuales los elementos son diseñados.

El sistema disipador de un edificio debe controlar la respuesta lateral ante distintos niveles de intensidad; esto se logra mediante el aumento de la rigidez lateral y daño controlado. La rigidez lateral la aportan ambos subsistemas (dispositivos histeréticos y sistema de contraviento) trabajando como resortes en serie, mientras tanto, el daño controlado está a cargo de los dispositivos histeréticos.

El método de diseño del sistema estructural desarrollado para este trabajo se enfoca en cumplir con las relaciones de rigidez establecidas. El objetivo de resistencia se establece en un 10% del peso total, una cifra que está relacionada con una aceleración efectiva de diseño aproximada para estructuras dúctiles en zonas de alto peligro sísmico en terrenos blandos de la ciudad de México y de otro tipo de terrenos del país, conforme se puede obtener con el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 2004 (NTCS 2004) o en el Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad (MOC-2008 2009). El desplazamiento total de la estructura no se limita directamente con algún parámetro.

En la figura 3.8 se resume esquemáticamente el método de diseño del sistema global desarrollado para este trabajo, el cual se basa en un proceso iterativo en el que se propone inicialmente el sistema gravitacional mínimo, que se puede concebir cumpliendo con los requisitos para marcos dúctiles de concreto de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2004 (NTCC 2004) sección 7. Posteriormente, este prediseño se ajusta de acuerdo con los objetivos de relaciones de rigidez establecidos. Ya dimensionados ambos sistemas, se hace el completo detallado de ambos sistemas (diseño por capacidad).

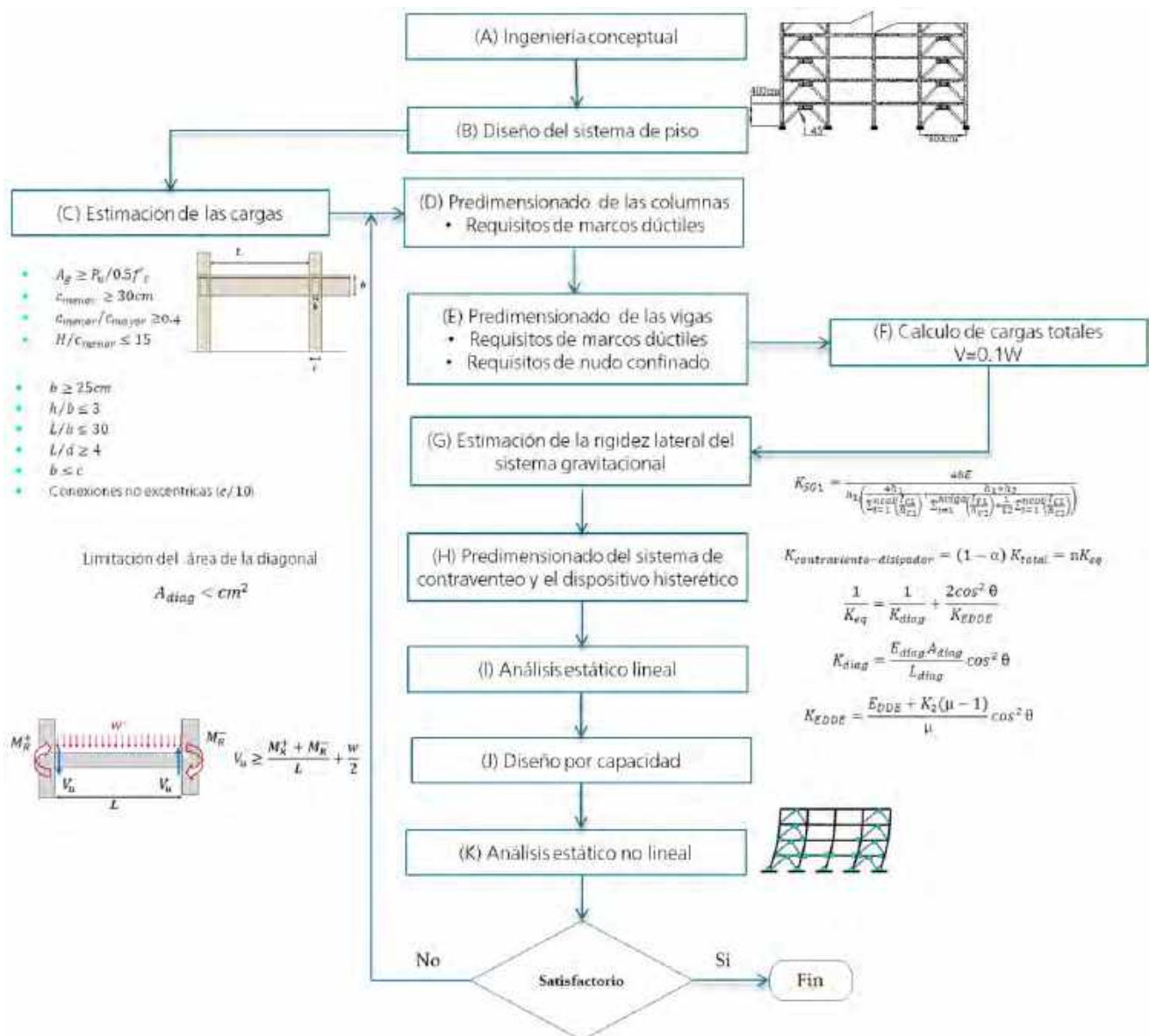


Figura 3.8. Metodología de diseño

A. Ingeniería conceptual

El diseño de los modelos se hizo lo más apegado a la realidad posible. Inicialmente se investigó la disponibilidad en México de los materiales para la construcción de la estructura; de esta manera se formó una base de datos para el diseño de los modelos, la cual contiene:

- Disponibilidad de resistencias nominales a compresión del concreto
- Disponibilidad de secciones cajón
- Disponibilidad de barras de refuerzo
- Disponibilidad de placas de acero (soleras)

Si la estructura la concebimos desde la ingeniería básica, tenemos que decidir la estructuración, la disposición de los disipadores y su geometría. No obstante, en este estudio ya se tienen definidas esas variables, por consiguiente, los parámetros de decisión restantes son: las propiedades de los materiales, la selección de un sistema de piso y la ductilidad objetivo de los dispositivos histeréticos (distorsión última entre distorsión de fluencia, $\mu = \Delta_u/\Delta_y$).

Los parámetros de decisión más importantes:

- Estructuración
- Selección de las relaciones de rigidez
- Sistema de piso
- Propiedades de los materiales (disponibilidad)

B. Diseño del sistema de piso

Tanto las cargas verticales como las laterales se generan al nivel del sistema de piso, y su función principal es transmitir estas cargas de manera consistente al sistema gravitacional y al sistema disipador. Para todos los modelos, el sistema de piso que se diseñó consiste en una losa maciza de concreto reforzado apoyada perimetralmente y provista con vigas secundarias en ambas direcciones para fomentar un desempeño sísmico estable y cuyo peralte resultó de 10 cm (Tena *et al.* 2012). Las vigas secundarias tienen un peralte de 35cm y un ancho de 25cm; tanto el lecho superior como el lecho inferior de las vigas secundarias tienen 5 barras del número 6 (Fig. 3.9). La propiedad nominal del concreto para resistencia a compresión es de 400 Kg/cm². El refuerzo de la losa consiste en barras de acero del número 3, tanto en el lecho superior como en el inferior, separadas a cada 20 cm en ambas direcciones. La reglamentación utilizada para su diseño fueron las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2004 (NTCC 2004) en su sección 6. El diseño fue verificado ante deformaciones laterales mediante un modelo de elementos finitos empleando el programa SAP-2000.

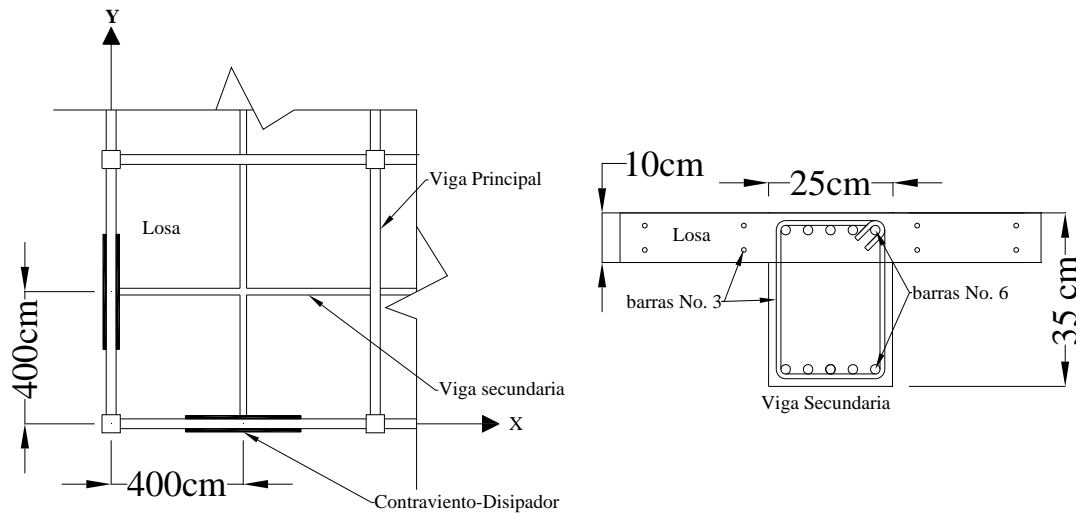


Figura 3.9. Sistema de piso

C. Estimación de cargas

Ya establecido el sistema de piso se hace una estimación de las cargas para cuantificar el nivel de carga axial que se presentaría en una columna de planta baja, en la combinación más desfavorable. Las combinaciones de acciones y sus factores son:

- $(Carga\ muerta + Carga\ viva\ maxima) \times 1.4$
- $(carga\ muerta + Carga\ viva\ instantanea) \times 1.1$

D. Predimensionado de las columnas

En este paso se hace un predimensionado de las columnas para todos los diferentes cambios de sección utilizando su carga actuante correspondiente, para lo cual, se utilizan los requisitos geométricos de marcos dúctiles del capítulo 7 de las NTCC 2004:

- $A_g \geq P_u / 0.5f'_c$
- $c_{menor} \leq 30cm$
- $c_{menor} / c_{mayor} \geq 0.4$
- $H / c_{menor} \geq 15$

En la figura 3.10 se muestra la nomenclatura usada para la geometría de elementos.

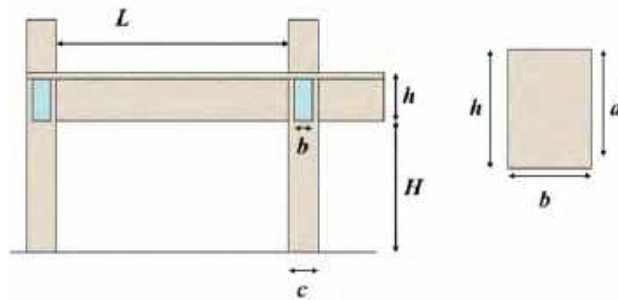


Figura 3.10. Geometría en los elementos

Cumpliendo con los requisitos geométricos, obtenemos las dimensiones mínimas que pueden tener las columnas para diseñarse dúctilmente de acuerdo con las NTCC 2004, dependiendo de los objetivos de diseño; estas dimensiones pueden modificarse a criterio. En este paso también se identifican las columnas que no son miembros a flexocompresión mediante revisar la siguiente condición:

- $P_u > A_g f'_c / 10$

E. Predimensionado de las vigas

Una vez obtenidas las dimensiones de las columnas, se proponen secciones transversales de las vigas que tengan la proporción deseada y que cumpla con los requisitos geométricos de marcos dúctiles del capítulo 7 de las NTCC 2004:

- $25\text{cm} \leq b \leq c$
- $h/b \leq 3$
- $L/b \leq 30$
- $L/d \geq 4$
- Conexiones no excéntricas ($c/10$)

En la figura 3.10 se muestra la nomenclatura usada para la geometría de los elementos.

F. Cálculo de cargas totales

Ya teniendo predimensionado todo el sistema gravitacional, se hace un análisis de cargas considerando el peso de todos los elementos estructurales. De esta manera obtenemos el peso distribuido que le corresponde al marco de estudio, también obtenemos los pesos por nivel que se utilizan para obtener la distribución de fuerzas laterales (distribución triangular) y, por supuesto, el peso total de la estructura lo cuantificamos en este paso.

G. Estimación de la rigidez lateral del sistema gravitacional

Una vez definido el sistema gravitacional (SG), se procede a estimar la rigidez lateral correspondiente a cada entrepiso, para calcular la rigidez lateral del marco, predimensionado se utilizan las fórmulas de Wilbur presentadas, entre otras fuentes, en Bazán y Meli (2008).

La rigidez de entrepiso es la relación entre la fuerza cortante absorbida por un marco, muro o contraviento en un entrepiso y el desplazamiento horizontal relativo entre los dos niveles que lo limitan. La rigidez así definida no es independiente del sistema de fuerzas laterales y para calcularla con rigor debe conocerse previamente el sistema (Bazán y Meli 2008):

- Para el primer entrepiso, suponiendo columnas empotradas en la cimentación:

$$K_{SG1} = \frac{48E}{h_{SG1} \left(\frac{4h_1}{\sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{c1}}{h_{c1}} \right)} + \frac{h_1+h_2}{\sum_{i=1}^{nviga} \left(\frac{I_{v1}}{h_{v1}} \right) + \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{ncol} \left(\frac{I_{c1}}{h_{c1}} \right)} \right)} \quad 3.1$$

- Para el segundo entrepiso, suponiendo columnas empotradas en la cimentación:

$$K_{SG2} = \frac{48E}{h_{SG2} \left(\frac{4h_2}{\sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{c2}}{h_{c2}} \right)} + \frac{h_1+h_2}{\sum_{i=1}^{nviga} \left(\frac{I_{v1}}{h_{v1}} \right) + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{c2}}{h_{c2}} \right)} + \frac{h_2+h_3}{\sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{v2}}{h_{v2}} \right)} \right)} \quad 3.2$$

- Para entrepisos intermedios:

$$K_{SGn} = \frac{48E}{h_{SGn} \left(\frac{4h_n}{\sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{cn}}{h_{cn}} \right)} + \frac{h_m+h_n}{\sum_{i=1}^{nviga} \left(\frac{I_{vm}}{h_{vm}} \right)} + \frac{h_n+h_o}{\sum_{i=1}^{ncol} \left(\frac{I_{v2}}{h_{v2}} \right)} \right)} \quad 3.3$$

donde:

E: Módulo de elasticidad

K_{SGn} : Rigidez del sistema gravitacional para el entrepiso en cuestión

I_{vn} : Inercia de las vigas del nivel sobre el entrepiso n

I_{cn} : Inercia de las columnas del entrepiso n

L_{vn} : Longitud de las vigas del nivel sobre el entrepiso n

L_{cn} : Longitud de las columnas del entrepiso n

m, n, o : Índices que identifican tres niveles consecutivos de arriba hacia abajo

h_{SGn} : Altura del entrepiso n

H. Predimensionado del sistema de contraventeo y el dispositivo histerético

Una vez cuantificada la rigidez lateral del marco y previamente establecidos las relaciones de rigidez objetivo, se procede a calcular la rigidez que debe aportar el sistema disipador y, por consiguiente, la rigidez objetivo, tanto del dispositivo histerético y del sistema de contraventeo. Estas relaciones se calculan para cada uno de los entrepisos; sin embargo, es en los cambios de sección del sistema disipador donde se cumplen, es decir, las relaciones de rigidez se cumplen cuando hay cambio de contravientos.

Las relaciones que deben guardar el sistema disipador (K_{SD}), el sistema total (K_{ST}), están dadas por la ecuación 3.4, (Tena 2000):

$$K_{SD} = (1 - \alpha)K_{ST} \quad 3.4$$

La rigidez que debe tener el sistema disipador (K_{SD}) en función de la rigidez del sistema gravitacional (K_{SG}) y la relación alfa (α) está dado por la ecuación 3.5.

$$K_{SD} = \frac{(1-\alpha)}{(\alpha)} K_{SG} \quad 3.5$$

Con las ecuaciones 3.4 y 3.5 se puede relacionar la rigidez del sistema disipador (K_{SD}) y la rigidez de las diagonales equivalentes (nK_{ESD}), las cuales son elementos axiales (con dos grados de libertad) que se utilizan para modelar los sistemas disipadores para un análisis estático lineal. De esta manera la relación de rigidez entre el sistema disipador y el número de diagonales equivalentes n está dada por la ecuación 3.6.

$$K_{SD} = nK_{ESD} \quad 3.6$$

El dispositivo histerético tiene una curva de capacidad bilineal como se ilustra en la figura 3.11 con la línea en color negro. No obstante, para los análisis estáticos lineales se necesita modelar este comportamiento de manera lineal, para ello se introduce el concepto de rigidez equivalente del dispositivo histerético (K_{EDH}); esta rigidez es la suma vectorial del comportamiento elástico y el inelástico. En la figura 3.11 se ilustra el concepto de rigidez equivalente del dispositivo histerético con la línea en color azul.

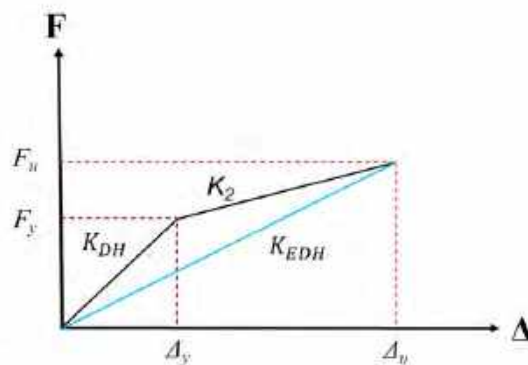


Figura 3.11 Comportamiento del dispositivo histerético

En ensayos experimentales (Whittaker *et al.* 1989 y 1991; Aiken *et al.* 1993 y Wu *et al.* 2012) se ha observado que los dispositivos histeréticos son capaces de desarrollar capacidades de ductilidad del orden de 10 ($\mu = 10$) durante ciclos muy grandes (100-180 ciclos) sin sufrir una degradación en su resistencia, y ductilidades máximas del orden de ($\mu = 15$) que conllevan a la falla después de pocos ciclos (15-20 ciclos), un mejor conocimiento del desempeño del dispositivo histerético lo debe proporcionar el fabricante; sin embargo, una ductilidad de 10 ($\mu = 10$) es un valor que debe tomarse como un indicador del nivel de deformación que debe tolerarse para fines de diseño.

La rigidez equivalente del dispositivo histerético (figura 3.11) modelada como un elemento axial con una rigidez efectiva en función de la ductilidad objetivo (distorsión última entre distorsión de fluencia, ($\mu = \Delta_u/\Delta_y$) y la pendiente posterior a la fluencia (K_2) está dada por la ecuación 3.7:

$$K_{EDH} = \frac{K_{DH} + K_2(\mu - 1)}{\mu} \quad 3.7$$

La rigidez de las diagonales del sistema contraventeo (K_{SC}) está definida con la ecuación 3.8, esta rigidez corresponde a la de un elemento axial elástico.

$$K_{SC} = \frac{E_{SC} A_{SC}}{L_{SC}} \cos^2 \theta \quad 3.8$$

El sistema disipador está conformado por el sistema de contraventeo y los dispositivos histeréticos. Este sistema se puede modelar como un resorte en serie utilizando el concepto de rigidez efectiva del dispositivo histerético, por tanto, el sistema debe cumplir con la ecuación 3.9 (Tena 2000):

$$\frac{1}{K_{ESD}} = \frac{1}{K_{SC}} + \frac{2 \cos^2 \theta}{K_{EDH}} \quad 3.9$$

La ecuación 3.9, relaciona la rigidez del sistema de contraventeo con la rigidez del dispositivo histerético. De este modo, se puede utilizar las ecuaciones 3.7 y 3.8 para sustituirlas en la ecuación 3.9 y despejar el área de la diagonal (A_{SC}). La ecuación 3.10 es el resultado de la sustitución y el correspondiente despeje:

$$A_{SC} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad 3.10$$

donde:

$$a = \beta \left(E_{SC} \frac{\cos^2 \theta}{L_{SC}} \right)^2 \quad 3.11$$

$$b = \left(E_{SC} \frac{\cos^2 \theta}{L_{SC}} \right) [(\mu - 1) - (\beta K_{ESD}) - (2\mu K_{ESD} \cos^2 \theta)] \quad 3.12$$

$$c = -K_2 K_{ESD} (\mu - 1) \quad 3.13$$

La rigidez del elemento axial equivalente para el análisis estático lineal está dada por la ecuación 3.14, que se obtiene despejando K_{ESD} de la ecuación 3.9:

$$K_{ESD} = \frac{K_{SC}[\beta K_{SC} + K_2(\mu - 1)]}{\beta K_{SC} + K_2(\mu - 1) + 2\mu K_{SC} \cos^2 \theta} \quad 3.14$$

I. Análisis estático lineal

En este paso del proceso se tienen todas las características de los materiales, cargas actuantes y dimensiones tanto del sistema gravitacional como de la diagonal equivalente (modela al sistema disipador). Es posible entonces construir el modelo estático lineal en el programa de análisis estructural SAP-2000.

J. Diseño por capacidad

Una vez hecho el análisis estático lineal, se obtienen los requerimientos de resistencia en los elementos estructurales para cada sección. Por tanto, se procede con el diseño por capacidad de la estructura. El diseño de los elementos estructurales favorece el mecanismo de daño controlado, por consiguiente, se diseña primero el dispositivo histerético, después el sistema de contraventeo garantizando que se comporte elásticamente, posteriormente se diseñan las vigas y por último las columnas. A continuación se explica con detalle el diseño por capacidad de todo el sistema.

Diseño de los dispositivos histeréticos

El elemento más débil del sistema total es el dispositivo histerético, de tal manera que debe dañarse primero. En este estudio se establece la resistencia que deben tener estos dispositivos en función de un cortante basal correspondiente al 10% del peso total ($V = 0.1W$), es decir, que a partir de que el cortante basal sea mayor al 10%, los dispositivos de planta baja empezarán a disipar energía y, para los otros dispositivos, a su correspondiente fuerza cortante de diseño, de acuerdo con una distribución triangular conforme a las NTCS 2004.

De esta forma, se determina la resistencia que deben tener los dispositivos histeréticos en todas las secciones con la proporción de fuerza cortante que le toque. A su vez, la rigidez de cada dispositivo está gobernada por las ecuaciones del paso H. La geometría exacta de los dispositivos histeréticos de interés se puede determinar con las ecuaciones presentadas en el Capítulo I.

Diseño de los contravientos

En esta etapa del diseño, se conoce el área de acero que le corresponde a los contravientos en disposición chevrón (paso H). Se debe entonces proporcionar una sección cajón que satisfaga el área de acero necesaria, y una resistencia tanto a compresión como a tensión que garantice su estado elástico. Esto se logra suministrando una resistencia a compresión mayor que la máxima que pueda transmitir el dispositivo histerético a su ductilidad máxima que pueda desarrollar, a partir de las ecuaciones presentadas en el paso H se puede deducir:

- Relaciones de rigidez entre SC y DH:

$$\beta K_{diag} = K_{DH} \quad 3.15$$

- Cortante máximo que transmiten los dispositivos histeréticos (κ_2 es la pendiente post-fluencia):

$$\kappa_2 K_{DH} = \frac{V_{uSC} - V_{uDH}}{\Delta_y(\mu - 1)} \quad 3.16$$

$$V_{u diag} = \kappa_2 K_{DH} \Delta_y(\mu - 1) + V_{uDH} \quad 3.17$$

$$V_{u diag} = 0.5 P_{diag} \cos 45^\circ \quad 3.18$$

$$P_{SC} \geq \frac{2V_{uSC}}{\cos 45^\circ} \quad 3.19$$

Conservadoramente, se puede fijar que el cortante de diseño de una diagonal del sistema de contraviento (V_{uSC}) es 2 veces mayor al cortante de diseño del dispositivo histerético (V_{uDH}). La resistencia de diseño se calcula de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras Metálicas 2004 (NTCM 2004). Los contravientos son secciones tipo 1 (secciones para diseño plástico y para diseño sísmico con factores Q de 3 ó 4) que pueden alcanzar el momento plástico reducido por compresión en barras flexocomprimidas y conservarlo durante las rotaciones inelásticas necesarias para la redistribución de momentos en la estructura y para desarrollar las ductilidades adoptadas en el diseño de estructuras construidas en zonas sísmicas. Las secciones satisfacen los siguientes requisitos:

- Valor máximo admisible de las relaciones ancho/grueso:

$$\frac{\text{ancho}}{\text{grueso}} \leq 1.47 \sqrt{\frac{E_s}{F_y}} \quad 3.20$$

- Valor máximo admisible de su relación de esbeltez efectiva

$$\frac{KL}{r} < \sqrt{\frac{E_s}{F_y}} \quad 3.21$$

La resistencia a compresión se calcula como:

$$R_c = \frac{F_y}{(1 + \lambda^{2n} - 0.15\lambda^{2n})^{1/n}} A_t \leq F_y A_t \quad 3.22$$

donde:

$$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E_s}} \quad 3.23$$

Diseño de los elementos viga

Con el análisis estático lineal (que también es función del patrón de cargas) deformamos al sistema total hasta el inicio hipotético de la fluencia del sistema gravitacional, recordando que en el análisis estático lineal modelamos las rigideces equivalentes de los dispositivos histeréticos considerando que éstos están desarrollando su máxima ductilidad (se encuentran en estado no lineal). Por consiguiente, a partir de este punto de deformación la resistencia adicional que suministremos al sistema gravitacional tendrá como consecuencia que el sistema gravitacional se mantenga elástico para deformaciones mayores. Entonces, el modelo elástico lineal nos indica la resistencia mínima que deben tener las vigas para que la fluencia del sistema gravitacional comience una vez el dispositivo histerético haya alcanzado su ductilidad objetivo, es decir, que la distorsión en determinado entrepiso sea mayor a la distorsión donde el daño lo absorbe únicamente el disipador.

Dar un comportamiento estable a flexión implica proteger el par resistente para mantener su estabilidad en el intervalo de comportamiento plástico. Esto se logra por medio de un detallado adecuado que, entre otras cosas, implica un balance adecuado entre C y T (ecuación 3.24).

$$M_n^+ \geq \frac{M_n^-}{2} \quad 3.24$$

Para el diseño de los elementos a flexión, en el caso de las vigas, se considera la contribución de la losa de acuerdo con las NTCC 2004, modelando las secciones como vigas T. La resistencia adicional a partir del punto donde el sistema disipador alcanza su máxima ductilidad es a criterio del diseñador; sin embargo, en este estudio a las vigas se les dio una resistencia sólo un poco mayor a partir de ese punto, es decir, hipotéticamente el disipador debe desarrollar su máxima ductilidad antes de que la viga se dañe y se comporte no lineal.

Para favorecer un mecanismo plástico estable, que es el daño a flexión de las vigas, se suministra una resistencia a corte (diseño de estribos) tal, que aun desarrollando la máxima resistencia a flexión físicamente posible, el cortante resistente siempre sea mayor. Esto se logra mediante la suposición de que el elemento alcanza sus momentos máximos reales (momentos plásticos no reducidos por factores de seguridad y considerando la resistencia real de los materiales) simultáneamente en ambos apoyos y sumando la contribución del peso distribuido en la viga (ecuación 3.25), como se ilustra en la figura 3.13.

$$V_u \geq \frac{M_R^+ + M_R^-}{L} + \frac{w}{2} \quad 3.25$$

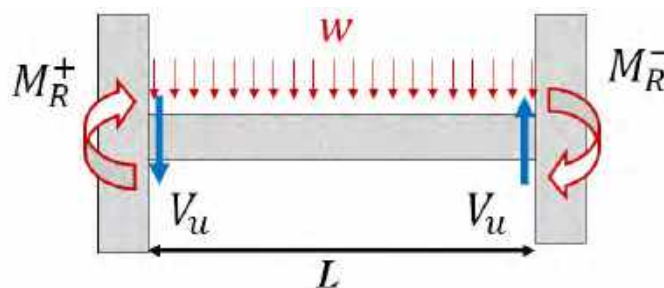


Figura 3.13. Capacidad a corte, (Adaptado de Terán 2014)

Debido a que las NTCC-04 consideran que un elemento que trabaja a flexión es aquél que soporta cargas axiales menores de $P_u > A_g f'_c / 10$, en el caso en que la carga axial calculada en las vigas exceda este límite, los elementos se diseñan como elementos en flexocompresión; en caso contrario, las vigas se diseñan como elementos sujetos a flexión.

Diseño de las columnas

El diseño a flexión de la columna se plantea a través del equilibrio de la conexión a la que llega (con base en las acciones al paño de la conexión, figura 3.14). El mecanismo viga débil-columna fuerte se fomenta a nivel nudo, de tal manera que la suma de los momentos de las columnas que llegan a él sea mayor que la suma de momentos de las vigas factorizadas (ecuación 3.26). Esta condición se revisa en los dos sentidos en los que actúa el sismo.

$$\sum M_c \geq \phi \sum M_v \quad 3.26$$

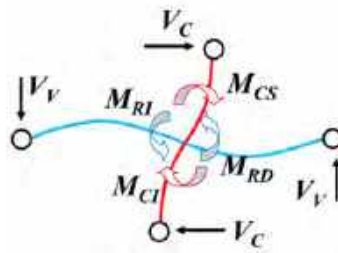


Figura 3.14. Momentos de diseño en columnas, (Adaptado de Terán 2014)

Para el cálculo de la carga axial actuante P (figura 3.15), se plantea el equilibrio a paño del nudo, considerando la carga axial que produce la carga distribuida muerta (flechas color negro), la carga axial producto del mecanismo donde ambos extremos de las vigas se articulan plásticamente (flechas color verde) y, la carga axial máxima que transmiten los contravientos cuando los dispositivos histeréticos están fluyendo plásticamente (flechas color azul), de tal manera que se tienen dos casos extremos de axial esperado: A) cuando la columna extrema se encuentra en tensión y, B) cuando la columna extrema se encuentra a compresión.

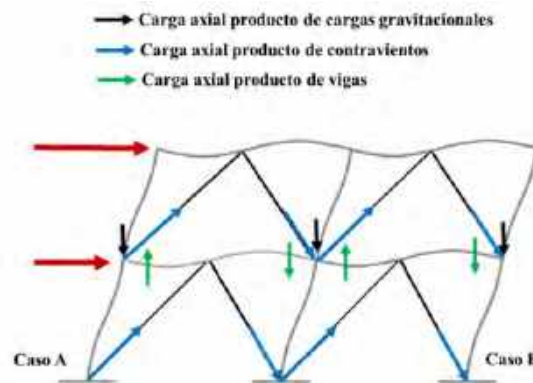


Figura 3.15. Cortantes de diseño en columnas

Para favorecer el mecanismo plástico estable, que es preferir como último recurso de prevención del colapso el daño a flexión de las columnas en lugar de una falla a cortante de éstas, se suministra una resistencia a corte (diseño de estribos) tal, que aun desarrollando la máxima resistencia a flexión físicamente posible, el cortante resistente siempre sea mayor. Esto se logra mediante la suposición de que el elemento alcanza sus momentos máximos reales (momentos plásticos no reducidos por factores de seguridad y considerando la resistencia real de los materiales) simultáneamente en ambos apoyos, como se ilustra en la figura 3.16.

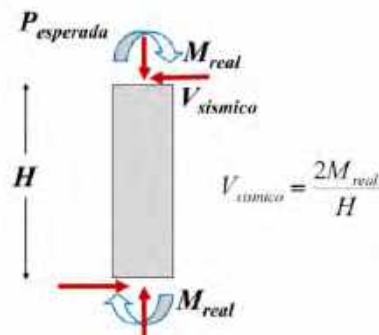


Figura 3.16. Diseño a corte en columnas, (Adaptado de Terán 2014)

Diseño de los nudos

Los nudos son la parte de la columna comprendida en el peralte de las vigas que llegan a ella. Son zonas de discontinuidad geométrica que están sujetas a altas concentraciones de esfuerzos.

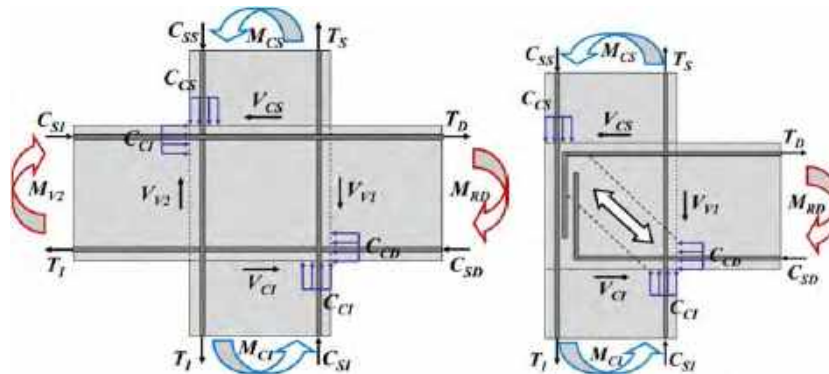


Figura 3.17. Comportamiento de las conexiones, (Adaptado de Terán 2014)

Los nudos fueron diseñados para resistir las demandas de fuerza cortante con base en: (a) el número de caras confinadas y, (b) las fuerzas cortantes actuantes calculadas con base en las resistencias nominales a flexión (resistencias reales) de las vigas que concurren a los nudos, así como el refuerzo de la losa considerado en un ancho equivalente (figura 3.18), conforme a las NTCC-2004. Es importante mencionar que, adicional a la demanda de fuerza cortante calculada con base en el refuerzo longitudinal de vigas y losa, se consideró la componente de fuerza

horizontal transmitida a la conexión por parte de las diagonales de contraventeo, por la proyección de la carga axial que se desarrolla en dichos elementos (figura 3.18).

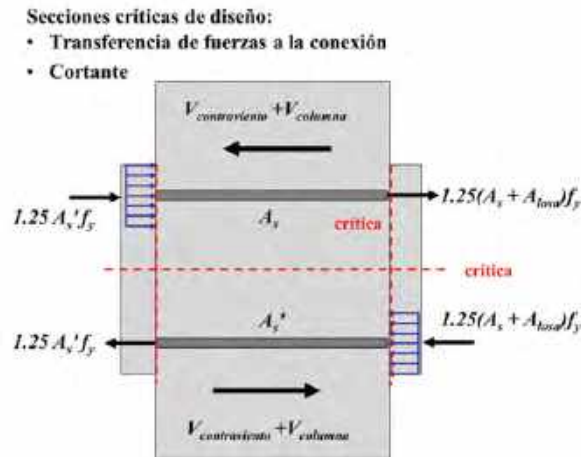


Figura 3.18. Comportamiento de las conexiones (Adaptado de Terán 2014)

Los lineamientos de las NTCC-04 no cuentan con guías específicas de diseño cuando a los nudos llegan contravientos y, por ello, no existen guías específicas de cómo revisarlos y diseñarlos. Es por esta razón que es importante hacer notar que existen algunas limitantes en cuanto al detalle de diseño de los nudos, a los que además de vigas y columnas, concurren las diagonales de contraventeo, ya que no se conoce completamente el mecanismo de anclaje de las diagonales por lo que este tema debe estudiarse con mayor detalle, pero queda fuera de los alcances de este estudio.

K. Análisis estático no lineal

Una vez calculadas todas las características del sistema gravitacional como disipador, se procede a crear un modelo, para el análisis estático no lineal. Donde se avalúan las demandas de deformación y resistencias inelásticas de la estructura. Este análisis también expone debilidades, tales como: mecanismos de pisos suaves, demandas excesivas de deformación, irregularidades en la resistencia, sobrecargas en elementos frágiles tales como columnas, conexiones y elementos de concreto sujetos a grandes fuerzas cortantes.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO SÍSMICO REQUERIDOS PARA MARCOS DÚCTILES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS CONFORME A LA NORMATIVA CONSIDERADA

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis no lineales realizados a los modelos de estudio. Cabe mencionar que los modelos presentados corresponden a la última iteración realizada, que incluye al propio análisis no lineal. En muchas ocasiones se encontraron deficiencias en los modelos y se volvieron a diseñar hasta llegar a los modelos finales presentados en este capítulo, que desde el punto de vista del autor son satisfactorios y ejemplifican muy bien los comportamientos característicos (tanto positivos como negativos) de estos sistemas estructurales. Todos los modelos diseñados para los distintos niveles cumplen muy bien con las relaciones de rigidez lateral ($\alpha = K_{SG}/K_{ST}$), siendo muy claro el comportamiento para los tres casos de estudio.

4.2. Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal es una técnica simplificada de análisis no lineal que puede ser usada para estimar las demandas dinámicas impuestas a la estructura debido a un movimiento sísmico. Los resultados obtenidos en estudios como el de Lawson *et al.* (1994) así como otros, han demostrado que el análisis estático no lineal es una herramienta muy útil, más no infalible para evaluar las demandas de deformación y resistencias inelásticas, y también para reconocer debilidades en el diseño (Lawson *et al.* 1994)

Un análisis estático no lineal cuidadoso proporciona una idea de los aspectos estructurales que controlan el desempeño durante sismos severos. Para estructuras que vibran fundamentalmente en el modo fundamental, el análisis estático no lineal muy probablemente proporciona buenas estimaciones de demandas inelásticas a nivel global y a nivel de elementos (Lawson *et al.* 1994).

Este análisis también expone debilidades en el diseño que podrían permanecer ocultas en un análisis elástico lineal, tales debilidades pueden ser: mecanismos de pisos suaves, demandas excesivas de deformación, irregularidades en la resistencia, sobrecargas en elementos frágiles, tales como: columnas, conexiones y elementos de concreto sujetos a grandes fuerzas cortantes (Lawson *et al.* 1994).

Un desempeño sísmico adecuado implica que las resistencias disponibles y la capacidad de deformación exceden las demandas impuestas a la estructura para el sismo de diseño. Idealmente, la evaluación del desempeño se debería basar en un análisis dinámico no lineal, utilizando un conjunto de movimientos sísmicos representativos de la zona. Sin embargo, la complejidad del análisis no siempre puede ser justificado económicamente a excepción de casos especiales, y supone que existe el suficiente conocimiento para representar exactamente el comportamiento del ciclo carga-deformación de los elementos estructurales.

Los análisis estáticos no lineales se llevaron a cabo en el programa DRAIN-2DX, en el cual se modeló con rigor cada uno de los elementos estructurales, tanto del sistema gravitacional como del sistema disipador. Una visión más detallada de cómo se modelaron cada uno de los elementos se presenta a continuación.

4.2.1. Curva de capacidad global

Las estructuras con sistemas disipadores deben tener como objetivo de diseño: a) el daño mínimo del sistema gravitacional, tal que éste no necesite reparaciones y, b) concentración del daño en los dispositivos histeréticos (sin desconectarse). De este modo el estado límite de diseño de la estructura provista con un sistema disipador correspondería al operacional (figura 4.1).

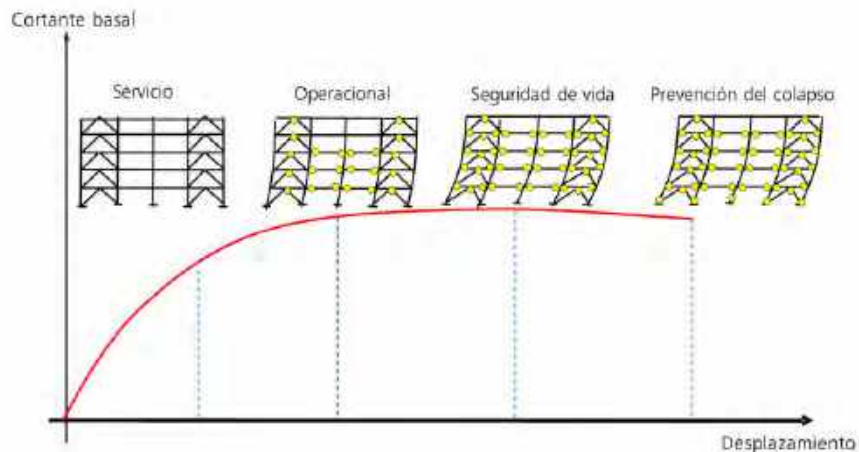


Figura 4.1. Estados límite de la curva de capacidad global, (Adaptado de Terán 2014)

En cuanto a la ductilidad y sobrerresistencia, figura 4.2, para la obtención de la ductilidad global (Q) y la sobrerresistencia global (R), se consideró el inicio de la fluencia (Δ_y) y el cortante de fluencia (V_y) de la estructura completa a partir de que el sistema disipador comienza a disipar energía. La definición de la fluencia última (Δ_u) y el cortante último (V_u) de la estructura, se hizo a partir de tomar en cuenta cuándo un dispositivo cualquiera alcanza su ductilidad objetivo.

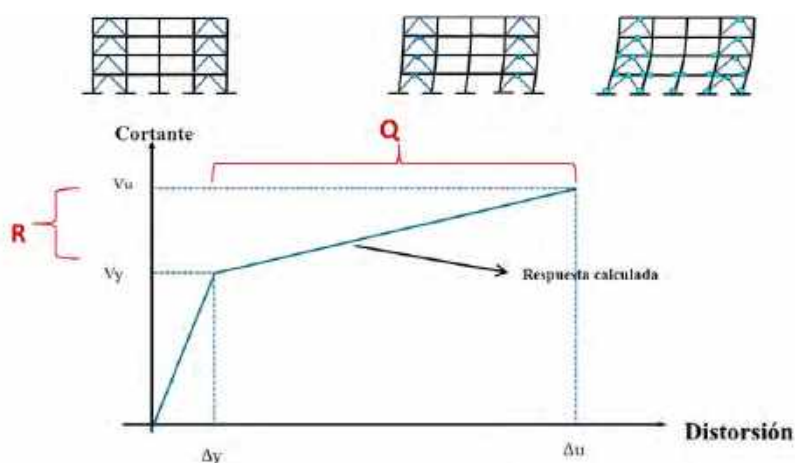


Figura 4.2. Ductilidad y sobrerresistencia de la curva de capacidad global

4.2.2. Curva de capacidad a nivel elemento (momento-giro plástico)

El nivel de daño estructural que sufre un elemento depende de su nivel de deformación plástica; conforme mayor sea la demanda de deformación plástica, mayor será el nivel de daño. En la figura 4.3 se ilustra esquemáticamente como se consideran los niveles de daño a nivel elemento (vigas y columnas).

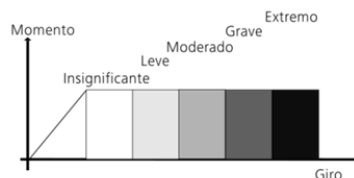


Figura 4.3. Curvas de capacidad a nivel elemento

4.2.3. Modelado de vigas

Las vigas se modelaron como elementos tipo 2, de acuerdo con la clasificación del programa DRAIN-2DX. La forma de la superficie de fluencia no considera la interacción carga axial-momento resistente, ya que durante el análisis por capacidad no se encontraron vigas que fueran potencialmente elementos flexocomprimidos. Los efectos P-delta geométricos se toman en cuenta para estos elementos. Los diagramas momento-curvatura a nivel sección se calcularon con el programa CSISD (Computers and Structures, Inc. Section Designer, CSISD, por su acrónimo en inglés) donde se suponían las condiciones de carga axial más desfavorables para cada sección. El giro plástico de las curvas de capacidad a nivel elemento se calcularon conservadoramente con la aproximación;

$$\theta_{pu} = (\varphi_u - \varphi_y) \left(\frac{d}{2} \right) \quad 4.1$$

- θ_{pu} : Giro plástico último que resiste el elemento estructural
 d : Peralte del elemento
 φ_u : Curvatura última a nivel sección del elemento
 φ_y : Curvatura de fluencia a nivel sección del elemento

El giro plástico máximo calculado con la ecuación 4.1 representa el límite máximo de daño (daño extremo) que puede ser admitido por el elemento. Como se ilustra en la curva de capacidad de la figura 4.3, el giro de fluencia es un dato que calcula el programa DRAIN-2DX al realizar el análisis no lineal, por tanto, con esta información se puede definir la curva de capacidad del elemento y los distintos niveles de daño como un porcentaje del giro plástico máximo, como se relaciona a continuación;

- | | | |
|-----------------------|--------|--------------------------------------|
| • Daño insignificante | —————→ | 0% al 20% del giro plástico máximo |
| • Daño leve | —————→ | 20% al 40% del giro plástico máximo |
| • Daño moderado | —————→ | 40% al 60% del giro plástico máximo |
| • Daño grave | —————→ | 60% al 80% del giro plástico máximo |
| • Daño extremo | —————→ | 80% al 100% del giro plástico máximo |

4.2.4. Modelado de columnas

Las columnas se modelaron como elementos tipo 2 de acuerdo con la clasificación del programa DRAIN-2DX. La forma de la superficie de fluencia considera la interacción carga axial-momento resistente. Los efectos P-delta geométricos se toman en cuenta para estos elementos. Las diagramas de momento-curvatura a nivel sección se calcularon con el programa CSISD, donde se suponen las condiciones de carga axial más desfavorables para cada sección. Finalmente, las curvas de capacidad a nivel elemento se calcularon conservadoramente con la aproximación dada por la ecuación 4.1.

El giro plástico máximo calculado con la ecuación 4.1 representa el límite máximo de daño (daño extremo) que puede ser admitido por el elemento, como se ilustra en la curva de capacidad de la figura 4.3. Los niveles de daño se calculan de la misma forma que las vigas.

4.2.5. Modelado de dispositivos histeréticos

Los dispositivos histeréticos se modelaron como elementos tipo 2 de acuerdo con la clasificación del programa DRAIN-2DX. La forma de la superficie de fluencia no considera la interacción carga axial-momento resistente. Los efectos P-delta geométricos no se toman en cuenta para estos elementos. Las resistencias suministradas son las correspondientes al cortante de diseño.

Los dispositivos histeréticos se modelaron considerando que tienen una altura constante de 50 cm, una resistencia a corte que está en función del cortante basal de diseño ($V = 0.1W$) y su rigidez en función de la relación β (rigidez del dispositivo histerético entre la rigidez del sistema de contraventeo, $\beta = K_{DH}/K_{SC}$). La ingeniería de detalle (dimensionamiento) de los dispositivos histeréticos no se realizó para evitar que el estudio se limitara a un solo dispositivo en particular. Sin embargo, una revisión rápida de las ecuaciones para dispositivos tipo ADAS nos dice que las combinaciones de rigidez y resistencia son posibles variando los parámetros de geometría de las placas como lo muestran las ecuaciones 4.2 y 4.3 que son aproximaciones presentadas por Whittaker y colaboradores en 1989 (Tena 2000):

$$K_{DDE} = K_{ADAS} = n \left\{ \frac{2}{3} E b_{1eq} \left(\frac{t}{h} \right)^3 \right\} \quad 4.2$$

$$F_u = V_{ADAS} = n \left\{ \frac{\sigma_y b_{1eq} t^2}{2h} \right\} \quad 4.3$$

donde:

n : Número de placas en forma de reloj de arena que forman parte del dispositivo ADAS

$b_{1eq} = h/2$: Ancho equivalente de las placas en sus extremos

t : Espesor de cada placa

h : Altura de las placas

E : Módulo de elasticidad del acero con que se fabrican las placas de los dispositivos ADAS

4.2.6. Modelado de contravientos

Las diagonales de los contravientos se modelaron como elementos tipo 1 de acuerdo a la clasificación del programa Drain2DX. Los efectos P-delta geométricos se toman en cuenta para estos elementos. Las resistencias suministradas son las correspondientes a la carga axial de diseño.

4.3. Descripción de la presentación de resultados

Los resultados son presentados por niveles que a su vez se dividen en casos de estudio con respecto a la relación de rigidez α (rigidez del sistema gravitacional entre la rigidez del sistema total, $\alpha = K_{SG}/K_{ST}$). Inicialmente, se muestra un resumen de diseño (del sistema total) que contiene la geometría de los elementos así como el detallado de los elementos de concreto.

4.3.1. Resumen de diseño

En las tablas que contienen los resúmenes de diseño se reportan los aspectos más relevantes del diseño de los modelos. El peso presentado corresponde sólo al sistema gravitacional. Respecto al sistema disipador, el resumen de diseño sólo contiene las dimensiones del sistema de contraviento (área de las diagonales). El sistema gravitacional se encuentra muy bien detallado, como se ilustra en el Apéndice A. Se indica el detallado del acero longitudinal tanto de vigas y columnas para los distintos cambios de sección en la altura de la estructura. También se reporta el detallado del acero transversal para las distintas zonas (zonas plásticas y zonas elásticas). Las vigas se reportan sin la contribución de la losa por simplicidad, sin embargo, en el Apéndice A se reportan los croquis de armado tanto de vigas como de columnas.

4.3.2. Resistencias de diseño

En las tablas de resistencias se presentan las resistencias de los sistemas gravitacional y disipador, es decir, las resistencias nominales de vigas, columnas y dispositivos histeréticos y las resistencias de diseño (resistencias factorizadas) de las diagonales. Se presentan: a) el cortante de diseño del sistema total (V_D), b) las resistencias a corte nominales de los dispositivos histeréticos (V_n), c) las cargas axiales resistentes (P_R) y cortantes resistentes (V_R) del sistema de contraviento, d) los momentos plásticos nominales positivos (M_y^+) y negativos (M_y^-) de las vigas, calculados de acuerdo con las NTCC 2004, así como los giros plásticos máximos positivos (θ_p^+) y negativos (θ_p^-) calculados con el programa CSISD y, e) el momento plástico nominal positivo (M_p) sin el efecto de la carga axial (flexión pura) en el caso de las columnas calculado de acuerdo con las NTCC 2004, así como el giro plástico máximo positivo (θ_p) estimando para la carga axial máxima esperada, calculado con el programa CSISD.

4.3.3. Ductilidades y sobrerresistencias

El comportamiento global de cada modelo estudiado se resume en tablas que contienen dos índices muy importantes: la ductilidad y sobrerresistencia global del modelo. Las tablas se presentan en familias de modelos agrupadas por la relación de rigidez β (rigidez del dispositivo histerético entre la rigidez del sistema de contraventeo, $\beta = K_{DH}/K_{SC}$).

4.3.4. Curvas de capacidad global

En la figura 4.4 se presenta una gráfica típica de “curva de capacidad global”. En el eje vertical se muestra normalizada la fuerza cortante entre la fuerza cortante de diseño (V/V_D). En el eje horizontal se muestra la distorsión global en porcentaje ($\Delta(\%)$), entendida como el desplazamiento horizontal de la azotea dividida entre la altura total de la estructura. La línea roja de trazo continuo (G) representa la curva total de capacidad a corte del sistema total. La línea verde punteada (M) representa la curva de capacidad a corte del sistema gravitacional. La línea azul punteada (CD) representa la capacidad a corte del sistema disipador. Las líneas verticales representan los inicios de fluencia de los dispositivos histeréticos, vigas y columnas. La línea vertical punteada en azul (Δ_{fyd}) representa el inicio de la fluencia del sistema disipador. La línea vertical en verde (Δ_{fyb}) representa el inicio de la fluencia de las vigas. La línea vertical en magenta (Δ_{fyc}) representa el inicio de la fluencia de las columnas. Las curvas de capacidad se dibujan hasta que un dispositivo histerético alcanza la ductilidad objetivo (μ).

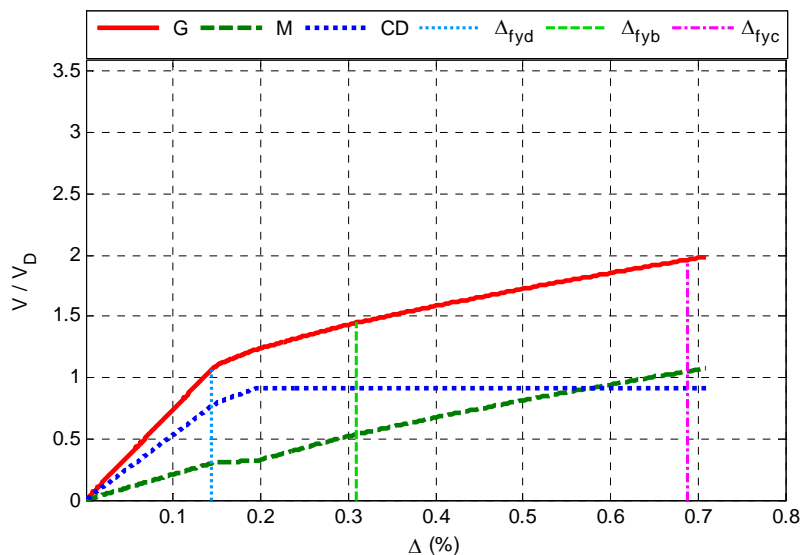


Figura 4.4. Curva de capacidad, típica

4.3.5. Ductilidad de los disipadores

En la figura 4.5 se presenta una gráfica típica de curva de ductilidades de los disipadores. En el eje vertical se muestra normalizada la fuerza cortante entre la fuerza cortante de diseño de cada dispositivo histerético (V/V_{yDE}). En el eje horizontal se muestra la distorsión del dispositivo en porcentaje ($\Delta(\%)$). Los disipadores se presentan numerados consecutivamente de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. El número posterior a la letra D (disipador) indica el número del dispositivo histerético, el número posterior a la letra N (nivel) indica el nivel al que pertenece. Las líneas en color azul representan las curvas de capacidad de los dispositivos histeréticos (histéresis estática). Las líneas verticales en color rojo indican la distorsión de fluencia y la distorsión máxima alcanzada por el disipador cuando el análisis estático no lineal se detuvo. El análisis estático no lineal se detiene hasta que un dispositivo histerético alcanza la ductilidad objetivo (μ).

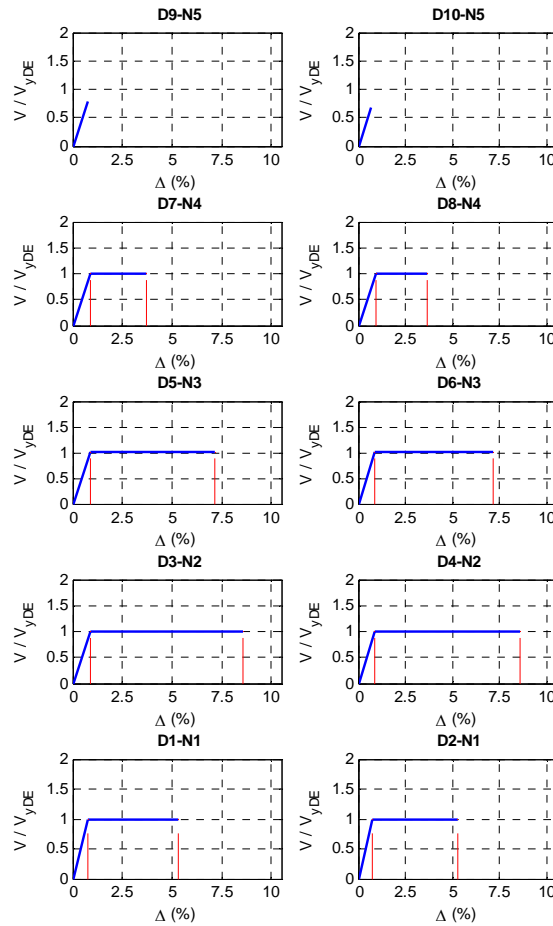


Figura 4.5. Curvas de capacidad de los disipadores, típica

4.3.6. Curvas de capacidad por entrepiso

En la figura 4.6 se presenta una gráfica típica de curvas de capacidad de cada entrepiso. En el eje vertical se muestra normalizada la fuerza cortante entre la fuerza cortante de diseño (V/V_D). En el eje horizontal se muestra la distorsión de entrepiso en porcentaje ($\Delta(\%)$). Las curvas de capacidad se presentan numeradas consecutivamente de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha. El número posterior a la letra N (nivel) indica el nivel al que pertenece. La línea roja (G) representa la curva total de capacidad a corte del sistema total. La línea verde punteada (M) representa la curva de capacidad a corte del sistema gravitacional. La línea azul punteada (CD) representa la capacidad a corte del sistema disipador. El análisis estático no lineal se detiene hasta que un dispositivo histerético alcanza la ductilidad objetivo (μ).

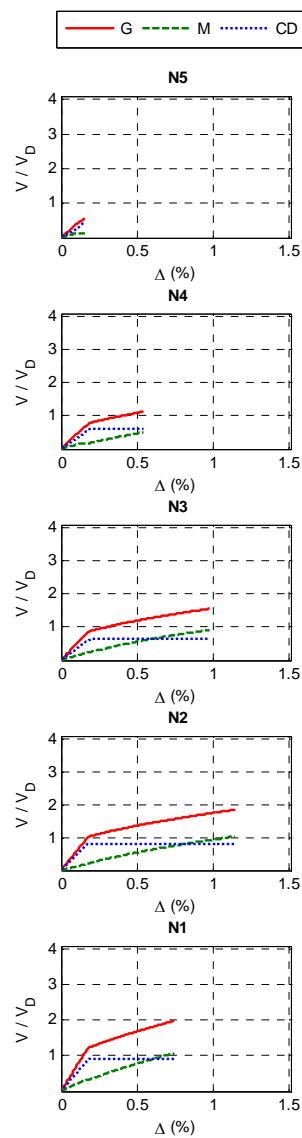


Figura 4.6. Curvas de capacidad de cada entrepiso, típica

4.3.7. Envoltentes de distorsión

En la figura 4.7 se presenta una gráfica típica de envoltentes de distorsiones de entrepiso. En el eje vertical se muestran los niveles. En el eje horizontal se muestra la distorsión de entrepiso en porcentaje ($\Delta(\%)$). La línea en color azul representa la distorsión de cada entrepiso cuando el primer dispositivo histerético comienza a fluir. La línea punteada en color rojo representa la distorsión máxima alcanzada por el entrepiso cuando el análisis estático no lineal se detuvo. El análisis estático no lineal se detiene hasta que un dispositivo histerético alcanza la ductilidad objetivo (μ).

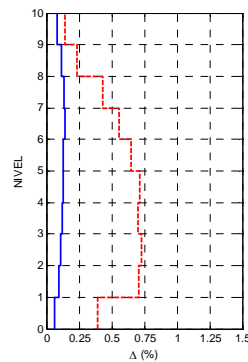


Figura 4.7. Envoltentes de distorsiones de entrepisos, típica

4.3.8. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas

En la figura 4.8 se presenta una ilustración típica de mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas. Los índices de daño se presentan en escala de grises y corresponden a distintos niveles de daño como se describió en la sección 4.1. Las diferentes secciones tanto del sistema gravitacional como del sistema disipador se representan con un color distinto para cada una.

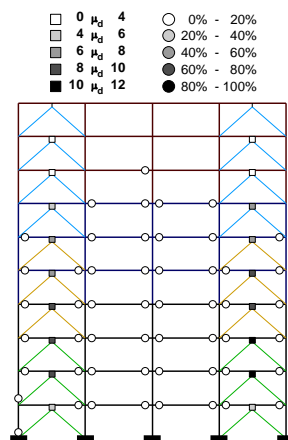


Figura 4.8. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, típico

4.4. Modelos de 5 Niveles

En general, no se encontraron dificultades en el diseño de los modelos de cinco niveles. Las tres relaciones de rigidez α se pueden implantar sin que represente un gran reto cumplir con los objetivos de diseño planteados en este estudio y los requisitos de diseño de las NTCC 2004.

Los modelos de cinco niveles se agrupan a su vez en tres conjuntos de modelos que corresponde al parámetro α ; cada conjunto α contiene a su vez todas las combinaciones de los parámetros β y K_2 como se muestra en la figura 4.9. Para los modelos de cinco niveles cada conjunto de modelos α se diseñó con el mismo sistema gravitacional; de esta manera sólo varía el sistema disipador para cada parámetro β .

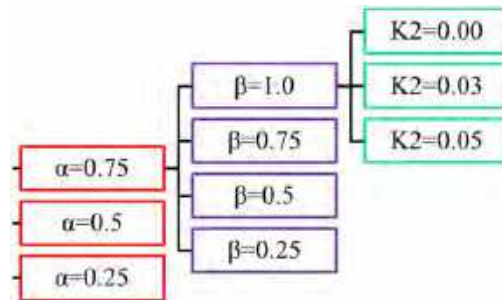


Figura 4.9 Casos de estudio

Para el diseño de los modelos de cinco niveles se decidió que el caso III (el conjunto de modelos $\alpha=0.25$) se diseñaran al límite, es decir, que se concibiera el sistema gravitacional mínimo necesario que permitieran las NTCC 2004. A partir de tener definido el modelo mínimo para el caso III, se diseñó el conjunto de modelos $\alpha=0.75$, donde el sistema gravitacional es de dimensiones marcadamente mayores con respecto al caso III, y posteriormente se diseñó al conjunto de modelos $\alpha=0.5$, donde las dimensiones del sistema gravitacional se encuentran entre los dos casos anteriores. Es importante señalar que las rigideces de los tres casos de estudio son muy similares, esto con el fin de hacerlas equiparables en cuanto a su desempeño. La ductilidad objetivo del dispositivo histerético con la que se diseñó el sistema disipador de todos los modelos de cinco niveles fue de 12 ($\mu_d = 12$). A continuación se presentan los detalles de cada caso.

CASO I ($\alpha = 0.75$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total

En la tabla 4.1 se observa que el conjunto de modelos $\alpha = 0.75$ tienen el sistema gravitacional de mayor peso de los tres casos de estudio, que es alrededor de un 12% más pesado con respecto al conjunto $\alpha = 0.25$, que tienen el sistema gravitacional mínimo necesario que permiten las NTCC 2004. En contraparte, el sistema de contraventeo tiene las áreas de acero más pequeñas de los tres casos de estudio.

5 Niveles $\alpha = 0.75$ $Peso = 4,173 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
				col.	c1xc2	Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
1.00	OR 152x6.3	36.1	CV1	V1	60x35	4 #8	120	#3 en 4 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 127x6.3	29.61	CV2						
0.75	OR 203x6.4	48.97	CV1			2 #8 + 2 #6			
	OR 203x4.8	37.23	CV2						
0.50	OR 203x9.5	71.61	CV1	C1	65x65	28 de #8	65	#5 en 4 ramas @10	#5 en 4 ramas @15
	OR 203x7.9	60.39	CV2						
0.25	OR 356x9.5	129.68	CV1						
	OR 305x9.5	110.32	CV2						

Tabla 4.1. Resumen de diseño, $N = 5$, $\alpha = 0.75$

En el reporte de las resistencias (Tabla 4.2) se observa como aumenta el margen de resistencia entre el sistema de contraventeo y los dispositivos histeréticos en la medida que la relación de rigidez aumenta (β menor), esto naturalmente ocurre para todos los casos. El sistema gravitacional es el más resistente de los tres casos. Las vigas son alrededor del doble de resistentes con respecto al caso III y las columnas son dos y media veces más resistentes con respecto al caso III.

5 niveles $\alpha = 0.75$ $V_D = 119.3 t$									
β	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (ton)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	14.9	39.6	28.0	43.73	60.86	0.0470	0.0620	216.60	0.0605
	11.7	26.5	18.7						
0.75	14.9	66.5	47.0						
	11.7	50.8	35.9						
0.50	14.9	96.3	68.1						
	11.7	81.6	57.7						
0.25	14.9	208.6	147.5						
	11.7	172.7	122.1						

Tabla 4.2. Resistencias de los sistemas, $N = 5$, $\alpha = 0.75$

En la figura 4.10 se ilustra el comportamiento característico de la curva de capacidad de los modelos $\alpha = 0.75$. Estos modelos presentan una alta rigidez inicial y final, debido a que no hay una degradación significativa en los elementos estructurales que forman parte del sistema

gravitacional, que es el sistema dominante en el comportamiento del sistema total. Por otro lado, el sistema disipador fluye a una distorsión menor que los casos II y III; de igual manera, las vigas fluyen a una distorsión menor. Las columnas no fluyen en ningún modelo durante los análisis no lineales.

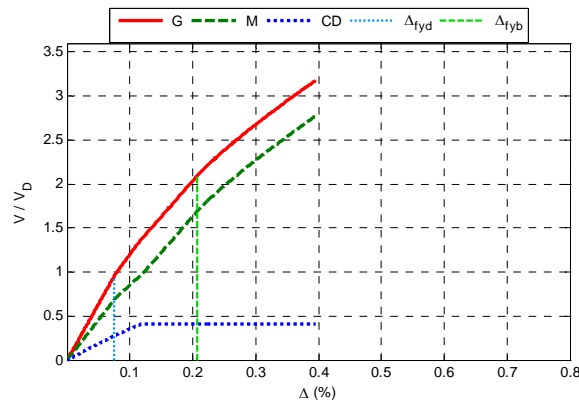


Figura 4.10. Curva de capacidad global, $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.11 se muestra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.75$. Las columnas permanecen elásticas y las vigas tienen un daño clasificado como insignificante; no obstante, el número de articulaciones plásticas es el mayor de los tres casos.

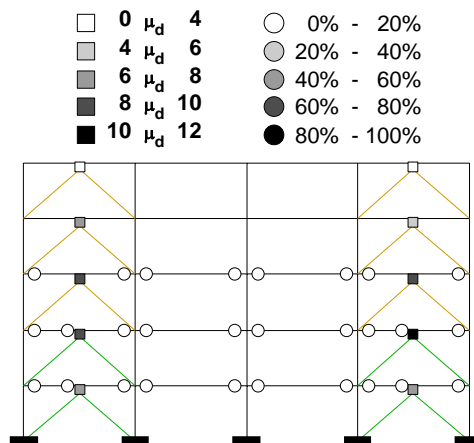


Figura 4.11. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO II ($\alpha = 0.5$) Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total

Como se reporta en la tabla 4.3, el sistema gravitacional tiene un tamaño intermedio entre los casos I y II. El sistema de contraventeo tiene áreas de acero que también se encuentran entre los casos I y II. Inclusive, el peso del sistema gravitacional se encuentra entre los dos casos mencionados.

5 Niveles $\alpha = 0.5$ $Peso = 3,924 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	Confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 178x7.9	52.32	CV1	V1	50x30	4 #8	100	#3 en 4 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 178x6.4	42.52	CV2						
0.75	OR 203x9.5	71.61	CV1			2 #8 + 2 #6			
	OR 203x7.9	60.39	CV2						
0.50	OR 305x9.5	110.32	CV1	C1	55x55	24 de #8	60	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 305x7.9	92.90	CV2						
0.25	OR 406x12.7	196.13	CV1						
	OR 356x12.7	170.32	CV2						

Tabla 4.3. Resumen de diseño, $N = 5, \alpha = 0.5$

En cuanto a las relaciones de resistencias que se presentan en la tabla 4.4, cabe destacar que las resistencias del sistema gravitacional se encuentran aproximadamente entre los casos I y III.

5 niveles $\alpha = 0.5$ $V_D = 130.8 t$									
β	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	32.7	64.7	45.8	35.82	47.17	0.0523	0.0815	145.13	0.0749
	25.6	53.0	37.5						
0.75	32.7	96.3	68.1						
	25.6	81.6	57.7						
0.50	32.7	172.7	122.1						
	25.6	145.5	102.9						
0.25	32.7	320.2	226.4						
	25.6	266.8	188.7						

Tabla 4.4. Resistencias de los sistemas, $N = 5, \alpha = 0.5$

En la figura 4.12 se ilustra el comportamiento característico de la curva de capacidad de los modelos $\alpha = 0.5$. Estos modelos presentan una alta rigidez inicial y una rigidez final, aproximadamente, de la mitad en comparación con la inicial, debido a que no hay una degradación significativa en los elementos estructurales que forman parte del sistema gravitacional, que en este caso aportan la mitad del comportamiento del sistema total. Por otro lado, el sistema disipador fluye a una distorsión mayor que para el caso I, pero menor que en el

caso III. En cuanto a las vigas, fluyen a una distorsión mayor que en el caso I, pero menor que para el caso III. Las columnas no fluyen en ningún modelo durante los análisis no lineales.

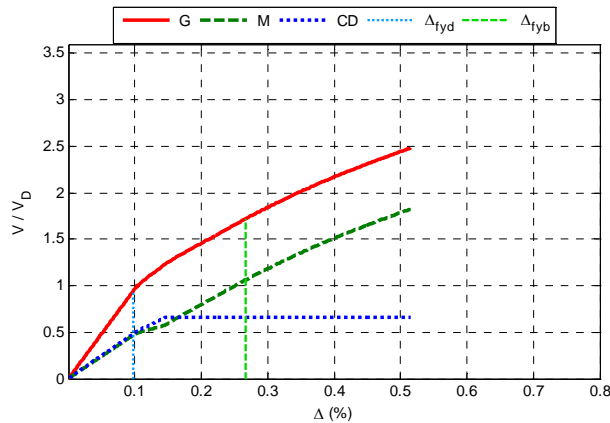


Figura 4.12 Curva de capacidad global, $N = 5$, $\alpha = 0.50$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Con base al estudio de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de los modelos $\alpha = 0.5$. Se observa que en ningún modelo se forman articulaciones plásticas en las columnas. Las vigas no rebasan en ningún modelo el 20% del giro plástico máximo. En la figura 4.13 se muestra un mapeo típico de los modelos del caso II.

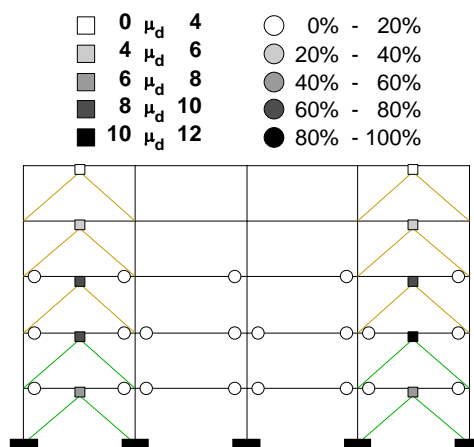


Figura 4.13. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5$, $\alpha = 0.50$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO III ($\alpha = 0.25$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total

Los aspectos más relevantes presentados en la tabla 4.5 conciernen al peso inferior y esbeltez del sistema gravitacional con respecto a los casos anteriores. En contraparte, el sistema de contraviento tiene las áreas de acero de mayor tamaño relativo a los demás casos.

5 Niveles $\alpha = 0.25$ $Peso = 3,714 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 152x12.7	67.1	CV1	V1	40x25	3 #8 + 2 #6	80	#3 en 3 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 152x9.5	52.13	CV2						
0.75	OR 254x9.5	90.97	CV1			2 #8 + 1 #6			
	OR 254x7.9	76.77	CV2						
0.50	OR 356x9.5	129.68	CV1	C1	45x45	16 de #8	60	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @20
	OR 305x9.5	110.32	CV2						
0.25	OR 457x15.8	280.54	CV1						
	OR 457x12.7	225.7	CV2						

Tabla 4.5 Resumen de diseño, $N = 5$, $\alpha = 0.25$

En la tabla 4.6 se reportan las resistencias de los modelos del caso III. Como se observa en dicha tabla, únicamente para beta igual a uno la resistencia a cortante que puede desarrollar el contraviento es inferior al cortante de diseño del dispositivo histerético, para las relaciones restantes las diagonales del contraventeo son muy suficientes. Las vigas y columnas desarrollan las resistencias más bajas de los tres casos de estudio. No obstante, los giros plásticos máximos que pueden desarrollar son los más grandes de los tres casos.

5 niveles $\alpha = 0.25$ $V_D = 148.6 t$									
β	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	55.7	69.9	49.4	23.06	32.09	0.0582	0.0802	75.90	0.0780
	43.5	55.8	39.4						
0.75	55.7	135.3	95.7						
	43.5	114.5	80.9						
0.50	55.7	208.6	145.5						
	43.5	172.7	122.1						
0.25	55.7	462.6	327.1						
	43.5	372.4	263.3						

Tabla 4.6. Resistencias de los sistemas, $N = 5$, $\alpha = 0.25$

En la figura 4.14 se ilustra el comportamiento característico de la curva de capacidad de los modelos $\alpha = 0.25$. Estos modelos presentan una alta rigidez inicial y una rigidez final de aproximadamente $\frac{1}{4}$ en comparación con la inicial, debido a que el comportamiento del sistema

total depende en su mayoría del sistema disipador y a que no hay una degradación significativa en los elementos estructurales que forman parte del sistema gravitacional. Las vigas fluyen a una distorsión mayor que para los casos I y II. En cuanto a las columnas, sólo se forma una articulación plástica de flexotensión en la base de la columna externa. Por otro lado, el sistema disipador fluye a una distorsión mayor que los casos I y II.

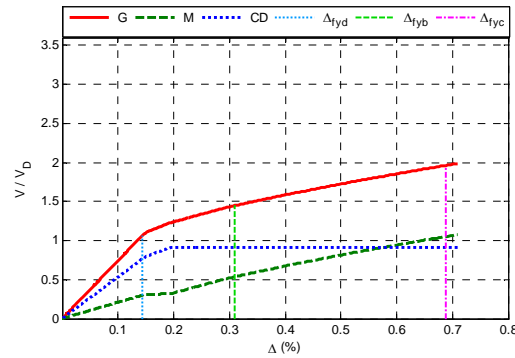


Figura 4.14. Curva de capacidad global, $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Los modelos del caso III mostraron la menor formación de articulaciones plásticas en el sistema gravitacional. Apenas una columna externa fluye a flexotensión en la base. Las vigas tienen un daño clasificado como insignificante. En la figura 4.15 se muestra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.25$.

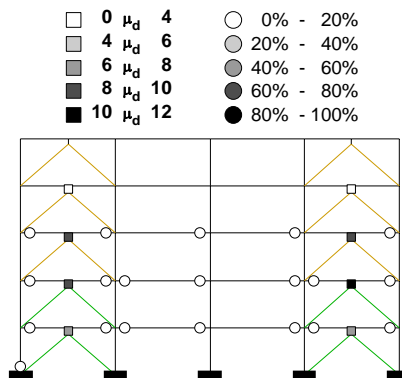


Figura 4.15. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

4.4.1. Observaciones generales de los modelos de 5 niveles

En esta sección se presentan, con fines ilustrativos, los modelos con mayor daño en el sistema gravitacional, mayor ductilidad y mayor sobrerresistencia de cada caso (conjunto alfa), que a su vez corresponden a los que tienen una mayor relación de rigidez beta ($\beta = 0.25$) y una mayor pendiente post-fluencia del dispositivo histerético ($K_2 = 5\%$). Los modelos correspondientes son: $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$; $N = 5, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$; $N = 5, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$. Los resultados completos de los modelos de cinco niveles se incluyen en el Apéndice A.

4.4.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se reportan las ductilidades (Q) y sobrerresistencias (R) de los tres casos de estudio. Se observa que los resultados siguen un patrón y no hay valores que estén fuera de lo esperado. En cuanto a los periodos fundamentales elásticos, se observa como varían ligeramente para los diferentes modelos, haciéndose ligeramente menores los que tienen una relación de rigidez mayor entre los DH y el SC. Esto se debe a que el sistema disipador tiene una rigidez ligeramente mayor conforme β disminuye.

5 Niveles $\alpha = 0.75$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.35	5.29	3.47	5.37	3.55	5.43	0.5160
0.75	3.48	5.57	3.60	5.66	3.69	5.71	0.5096
0.50	3.67	6.17	3.79	6.23	3.88	6.28	0.4996
0.25	3.89	6.75	4.00	6.81	4.08	6.84	0.4988

Tabla 4.7. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 5$, $\alpha = 0.75$

5 Niveles $\alpha = 0.50$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	2.61	5.23	2.80	5.39	2.93	5.48	0.5520
0.75	2.65	5.62	2.85	5.75	2.97	5.84	0.5305
0.50	2.70	6.03	2.90	6.14	3.03	6.23	0.5237
0.25	2.88	6.73	3.08	6.85	3.21	6.90	0.4995

Tabla 4.8. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 5$, $\alpha = 0.50$

5 Niveles $\alpha = 0.25$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	1.87	4.92	2.12	5.18	2.29	5.36	0.5248
0.75	1.91	5.44	2.18	5.71	2.35	5.87	0.5078
0.50	1.96	5.88	2.23	6.14	2.41	6.29	0.4918
0.25	1.94	6.07	2.20	6.32	2.39	6.49	0.4925

Tabla 4.9. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 5$, $\alpha = 0.25$

Los valores de las ductilidades globales tuvieron poca variación en todos los diferentes conjuntos α , caso contrario de los valores de sobrerresistencia que claramente están en función del parámetro β . El patrón de comportamiento de los valores de ductilidad y la sobrerresistencia se debe principalmente a dos factores:

1. La relación de rigidez entre el DH y el SC, debido a que entre mayor es la relación de rigidez (β menor), el sistema disipador mantiene su rigidez. Sin embargo, internamente el sistema aumenta la rigidez de la diagonal y disminuye la rigidez del dispositivo, lo que tiene como consecuencias:

- La reducción de la rigidez de los dispositivos tiene como consecuencia que el sistema gravitacional absorba un daño mayor (ya que es necesaria una distorsión de entrepiso mayor para alcanzar las ductilidades objetivo).
- El aumento de la rigidez de las diagonales tiene como consecuencia que los disipadores aumenten su eficiencia (ya que es necesaria una distorsión de entrepiso menor para que los dispositivos histeréticos disipen energía, esto aumenta la efectividad de los dispositivos).

2. El parámetro K_2 , ya que de igual manera, el sistema disipador tiene una mayor rigidez post-fluencia, y por lo tanto una resistencia mayor.

Los resultados obtenidos en los análisis estáticos no lineales (Tablas 4.7, 4.8 y 4.9) nos proporcionan un intervalo de valores que se podrían tomar como indicadores para el análisis estático lineal de un sistema genérico.

4.4.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador

Con base en el daño observado en los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, como los mostrados en la figura 4.16, se establece:

- Los modelos con mayor daño en el sistema gravitacional corresponden al caso I.
- Los modelos con un daño intermedio en el sistema gravitacional corresponden al caso II.
- Los modelos con el menor daño al sistema gravitacional corresponden al caso III.

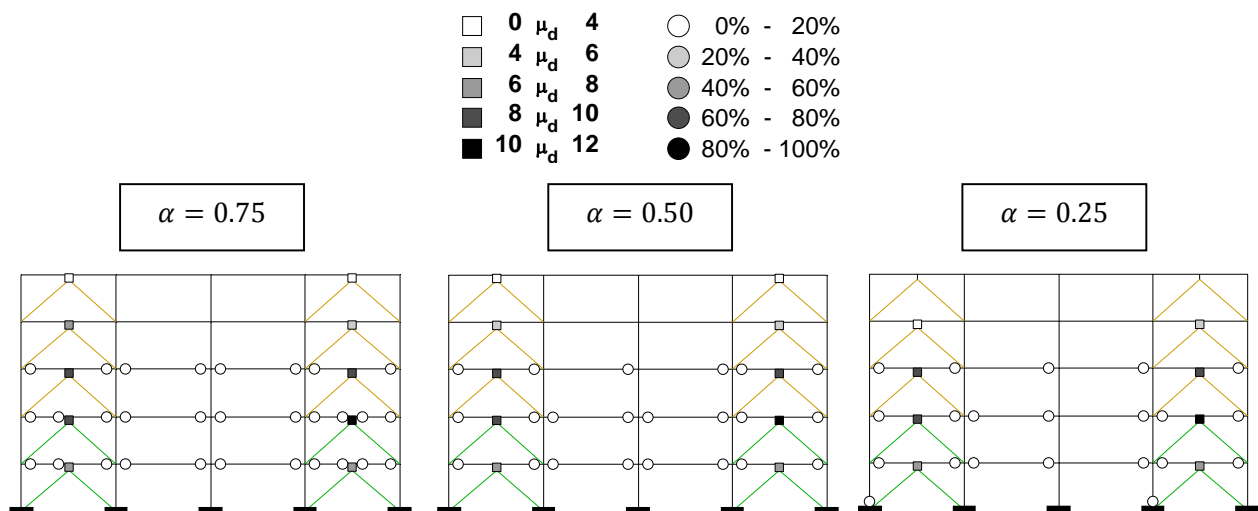


Figura 4.16 Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas modelos, $N = 5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Es crucial señalar que en todos los modelos los mecanismos de disipación de energía concuerdan con la filosofía de diseño por capacidad. En cuanto al comportamiento de las curvas de capacidad, como las mostradas en la figura 4.17, se establece:

- Para el caso I. No se aprecia un incremento significativo en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, es decir, si el sistema gravitacional fuese el único sistema sismorresistente, la curva de capacidad sería muy similar. La tasa de pérdida de rigidez es baja y, por tanto, el sistema total no cambia drásticamente sus propiedades dinámicas.
- Para el caso II. Se aprecia un incremento en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, es decir, hay una diferencia en las curvas de capacidad, con respecto al supuesto caso de que el único sistema sismorresistente fuera el sistema gravitacional. La tasa de pérdida de rigidez ya impacta de manera importante y, por tanto, el sistema total cambia significativamente sus propiedades dinámicas.
- Para el caso III, se aprecia un incremento importante en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, es decir, hay una diferencia importante en las curvas de capacidad con respecto al supuesto caso de que el único sistema sismorresistente fuera el sistema gravitacional. La tasa de pérdida de rigidez es alta y, por tanto, el sistema total cambia drásticamente sus propiedades dinámicas.

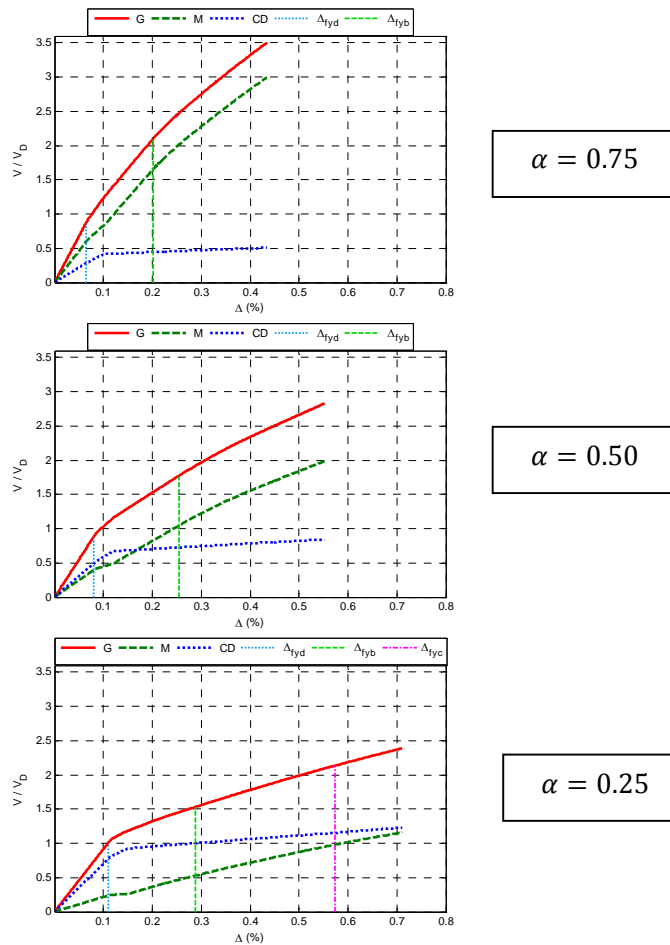


Figura 4.17 Curva de capacidad modelos. $N = 5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$;

Es importante recordar que el cortante con respecto al cual están normalizadas las curvas de capacidad no es el mismo para cada conjunto alfa, debido a la variación en el peso del sistema gravitacional, los respectivos cortantes de diseño son:

- Caso I ($\beta = 0.75$) $V_D = 119.3 t$
- Caso II ($\beta = 0.5$) $V_D = 130.8 t$
- Caso III ($\beta = 0.25$) $V_D = 148.6 t$

En la figura 4.18 se muestran las curvas de capacidad de cada entrepiso para los modelos que se vienen mostrando. Como se mencionó en el Capítulo 3, las relaciones de rigidez se cumplen en planta baja y para cada cambio de sección del sistema disipador. Los modelos de cinco niveles solo tienen un cambio de sección en el nivel tres. En las curvas de la figura 4.18 se aprecia que, en los niveles inmediatos superiores al cambio de sección del sistema disipador, la relación de rigidez aumenta, es decir, la rigidez del sistema disipador aumenta y la rigidez del sistema gravitacional disminuye. Este efecto se presenta en todos los modelos de todos los niveles.

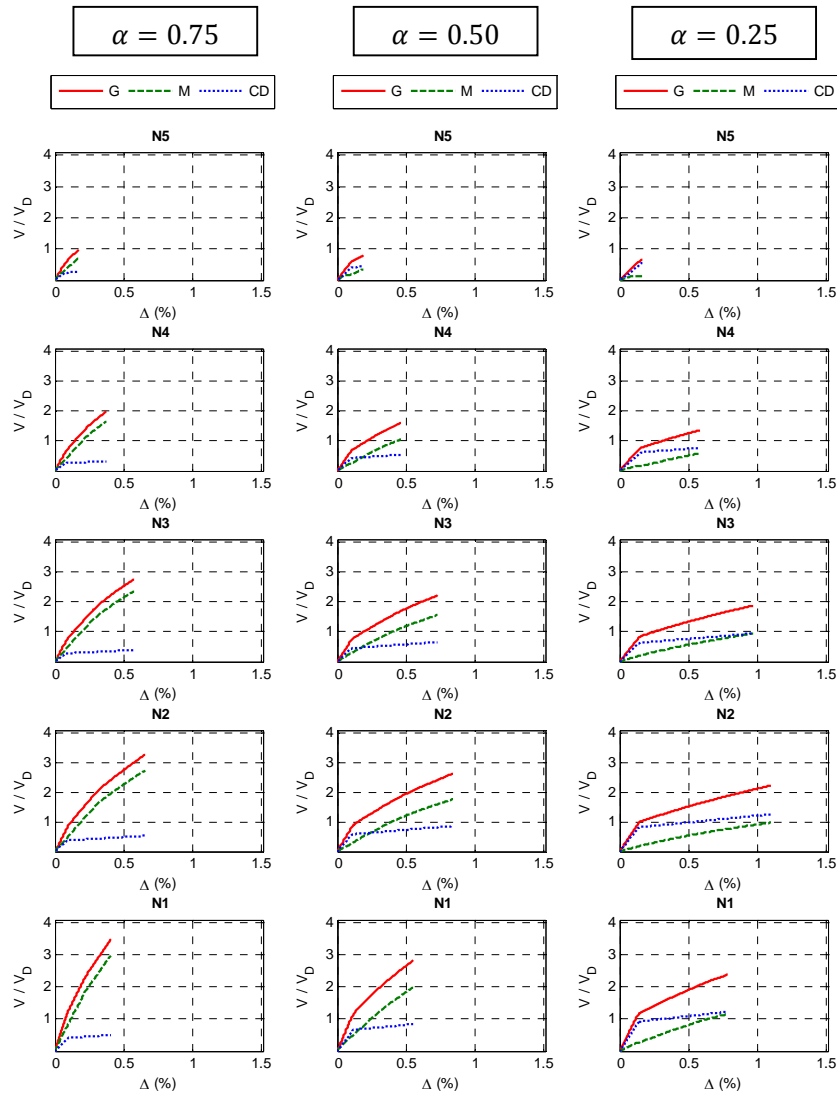


Figura 4.18 Curvas de capacidad por entrepisos modelos. $N = 5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Las ductilidades alcanzadas por los dispositivos histeréticos están relacionadas con las distorsiones de entrepiso; por consiguiente, un análisis de las gráficas de envolventes nos da una idea de cuál fue la demanda de ductilidad de los dispositivos.

En cuanto a las distorsiones del sistema total que ocasionan que los dispositivos histeréticos comiencen a disipar energía, y la distorsión en la cual alcanzan su ductilidad objetivo (figura 4.19), establecemos que:

- Caso I. Los dispositivos comienzan a disipar energía a distorsiones de entrepiso menores que para los casos II y III. Las distorsiones de entrepiso cuando los dispositivos alcanzan la ductilidad objetivo son menores que en los casos II y III.
- Caso II. Los dispositivos comienzan a disipar energía a distorsiones de entrepiso mayores que para el caso I, pero menores que el caso III. Las distorsiones de entrepiso cuando los dispositivos alcanzan la ductilidad objetivo son mayores que en el caso I, pero menores que el caso III.
- Caso III. Los dispositivos comienzan a disipar energía a distorsiones de entrepiso mayores que para los casos I y II. Las distorsiones de entrepiso cuando los dispositivos alcanzan la ductilidad objetivo son mayores que para los casos I y II.

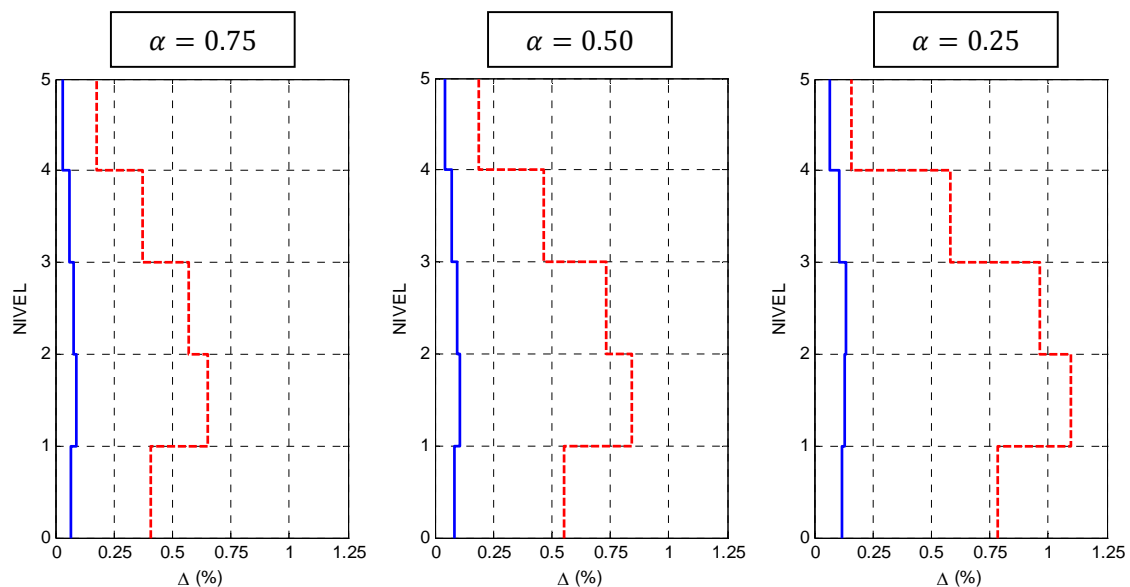


Figura 4.19. Envolventes de distorsiones de entrepisos. $N = 5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

En conclusión, la relación de rigidez alfa determina como se reparte el daño en el sistema total. El sistema con mayor rigidez absorbe la mayor cantidad de daño, por consiguiente, los modelos con mayor rigidez del sistema disipador tienen una disipación mayor de energía. De acuerdo con los objetivos de diseño, es deseable que el sistema gravitacional sufra el menor daño posible y, con base en ese criterio, la relación $\alpha = 0.25$ es el que tiene el mejor desempeño. Es además el sistema que disipa la mayor cantidad de energía, ya que la plastificación de los dispositivos conduce a un cambio drástico de la rigidez total del sistema. Otro aspecto positivo es la superior capacidad de deformación frente a los otros casos.

4.4.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador

Es importante señalar que los efectos que provocan las relaciones de rigidez entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo se magnifican o minimizan en función de la relación de rigidez entre el sistema disipador y el sistema gravitacional. Es decir, estos cobran importancia a medida que el sistema disipador aporta mayor rigidez, y decrecen cuando el sistema disipador aporta una menor rigidez.

Conforme disminuye el valor de β , tiene que aumentar la rigidez del sistema de contraventeo lo cual tiene como efecto una reducción en la distorsión de entrepiso, que conlleva a la fluencia de los dispositivos histeréticos. Esto se debe a que el sistema disipador mantiene su rigidez; sin embargo, internamente el sistema aumenta la rigidez de la diagonal y disminuye la rigidez del dispositivo, lo que nos conduce a los siguientes corolarios:

- La reducción de la rigidez de los dispositivos tiene como efecto que el sistema gravitacional absorba un daño mayor (ya que es necesaria una distorsión de entrepiso mayor para alcanzar las ductilidades objetivo), lo que redundará en una ductilidad global mayor.
- El aumento de la rigidez de las diagonales tiene como efecto que los disipadores aumenten su eficiencia (ya que es necesaria una distorsión de entrepiso menor para que los dispositivos histeréticos disipen energía), lo que redundará en una ductilidad global mayor.

En la tabla 4.10 se reportan las distorsiones de entrepiso, donde se inicia la fluencia de los dispositivos, y se aprecia cómo influye en mayor o menor medida para cada caso el parámetro β .

5 Niveles		K_2 0%	
β	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.50$	$\alpha = 0.25$
1.00	0.17%	0.10%	0.15%
0.75	0.16%	0.09%	0.14%
0.50	0.16%	0.09%	0.13%
0.25	0.16%	0.085%	0.11%

Tabla 4.10 Distorsiones de entrepiso donde inicia la fluencia de los dispositivos

En conclusión, la relación de rigidez β influye en el nivel de distorsión de entrepiso a la cual los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía. A una mayor relación de rigidez (β menor), se reduce la distorsión a la que los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía y, por tanto, la distorsión última de entrepiso es menor.

Sin embargo, el aumento de la relación de rigidez entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo no influye de manera drástica en el comportamiento de la curva de capacidad global; los cambios en la ductilidad global (Q) y sobrerresistencia global (R) son mínimos. En contraparte, las relaciones de rigidez mayores entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo (β menor) incrementan la complejidad en su implantación, debido a las mayores áreas de acero de las diagonales del sistema de contraventeo.

4.4.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador

Con base en los resultados obtenidos de los modelos de cinco niveles, se establecen los siguientes criterios con respecto a las relaciones de resistencia:

- a) Entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo
 - Suministrar una resistencia a compresión mayor que la máxima que pueda transmitir el dispositivo histerético a su ductilidad máxima que pueda desarrollar (ecuaciones 3.17, 3.19 y 4.4).
- b) Entre el sistema disipador y el sistema gravitacional
 - Suministrar, a criterio del diseñador, una resistencia adicional a las vigas a partir del punto donde el sistema disipador alcanza su máxima ductilidad; sin embargo, la resistencia máxima que se debe suministrar depende de las limitaciones de las NTCC-2004 y, principalmente, de la resistencia a flexocompresión y cortante de las columnas.
- c) Entre los elementos vigas y los elementos columnas
 - Suministrar resistencia a las columnas en función de la de las vigas; usualmente esta resistencia la rigen las columnas extremas que están a compresión y a tensión. Para garantizar el estado elástico en las columnas intermedias, basta con cumplir con la ecuación 4.5, donde la resistencia de la columna debe ser mayor a una y media veces la suma de las resistencias nominales a flexión, tanto positiva como negativa, de las vigas:

$$Mc_n^+ = (1.5/2)(Mv_n^+ + Mv_n^-) \quad 4.5$$

- d) Entre los nudos y los elementos que llegan a él
 - Es crucial hacer un diseño por capacidad, considerando todos los elementos que convergen al nudo, y garantizar la suficiente resistencia a corte.

4.4.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d

La ductilidad objetivo del dispositivo histerético con la que se diseñó el sistema disipador de todos los modelos de cinco niveles fue de 12 ($\mu = 12$). Recordando que los análisis estáticos no lineales se detuvieron cuando se alcanza la ductilidad objetivo ($\mu_d = 10$) en un dispositivo histerético cualquiera. En términos generales, los dispositivos histeréticos fueron demandados en mayor medida en el segundo entrepiso, y a partir de ese nivel, la demanda de ductilidad disminuye conforme aumenta en altura la estructura. En el primer nivel la demanda de ductilidad por parte de los disipadores es menor en comparación con el segundo nivel. Esto presumiblemente se debe a que los apoyos se consideran rígidos (apoyos empotrados), lo que trae como consecuencia menores niveles de distorsión. En la figura 4.20 se ilustra el comportamiento de las curvas de capacidad de los dispositivos histeréticos para los tres casos de estudios.

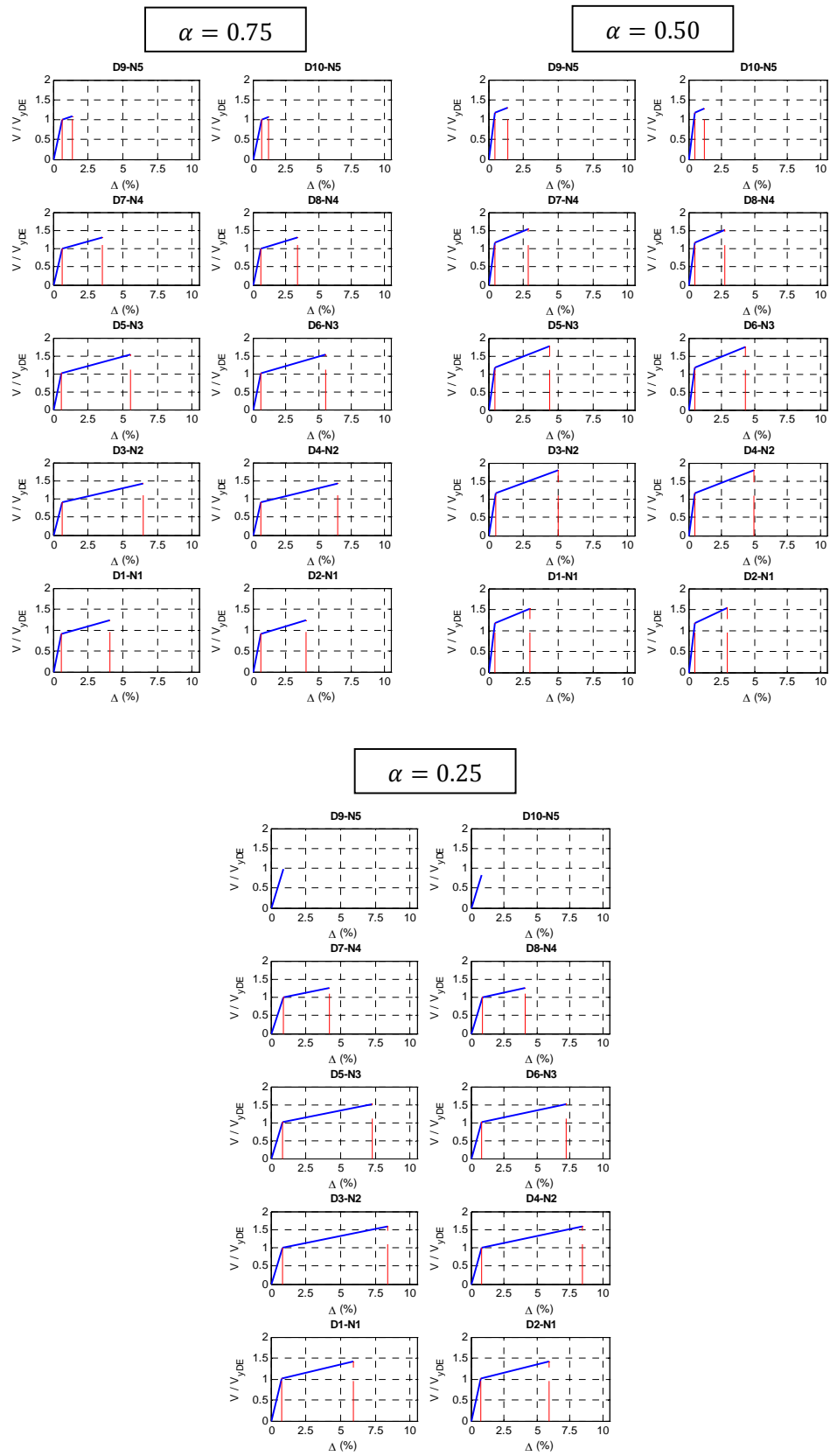


Figura 4.20. Curvas de capacidad de los disipadores, $N = 5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

En términos generales los dispositivos histeréticos tienen demandas de ductilidad grandes, a excepción de los localizados en el último entrepiso. Los modelos de cinco niveles pueden alcanzar fácilmente ductilidades grandes, por lo que es recomendable que las ductilidades de diseño para los dispositivos histeréticos sean del orden de 10 a 14.

4.4.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de servicio aquéllos que no le provoquen daño al sistema gravitacional:

- Caso I distorsiones menores al 0.2%
- Caso II distorsiones menores al 0.25%
- Caso III distorsiones menores al 0.3%

Es importante recordar que estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados; sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.4.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de seguridad de operación aquéllos que lleven a los disipadores histeréticos a su ductilidad máxima permitida ($\mu_d = 10$):

- Caso I distorsiones menores al 0.42%
- Caso II distorsiones menores al 0.55%
- Caso III distorsiones menores al 0.58%

Estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados; sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.5. Modelos de 10 Niveles

Para el diseño de los modelos de diez niveles no se presentan inconvenientes, las tres relaciones de rigidez α se implantan de manera relativamente sencilla. Para los modelos de diez niveles, cada conjunto de modelos α se diseñó con el mismo sistema gravitacional; de esta manera sólo varía el sistema disipador para cada parámetro β .

El caso III se diseñó de tal manera que el sistema gravitacional fuera lo más esbelto posible y que al mismo tiempo tuviera la capacidad de resistir la flexotensión demandada; sin embargo, el controlar la flexotensión en las columnas externas se vuelve el punto medular del diseño. Para el caso I se diseñó un sistema gravitacional robusto en comparación con el caso III, y para el caso II un sistema gravitacional de tamaño intermedio. Los tres casos de estudio tienen una rigidez

lateral total muy similar para de esta manera hacerlos equiparables. La ductilidad objetivo del dispositivo histerético con la que se diseñó el sistema disipador de todos los modelos de diez niveles fue de 12 ($\mu_d = 12$). A continuación se presentan los detalles de cada caso.

CASO I ($\alpha = 0.75$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total

Como se indica en la tabla 4.11, los modelos $\alpha=0.75$ son los de mayor peso superando en un 20% a los modelos del caso III. El sistema gravitacional consta de columnas robustas, así como vigas de un peralte considerable; en contraparte, el sistema de contraventeo tiene áreas de acero relativamente pequeñas.

10 Niveles $\alpha = 0.75$ $Peso = 10,200 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 356x9.5	129.68	CV1	V1	80x55	6 #10	160	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 305x9.5	110.32	CV2			4 #10 + 2 #8			
	OR 254x7.9	76.77	CV3	C1	90x90	36 de #10	90	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @10
0.75	OR 356x12.7	170.32	CV1	V2	75x50	4 #10 + 2 #8	150	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 305x12.7	144.52	CV2			4 #10			
	OR 305x9.5	110.32	CV3						
0.50	OR 406x15.8	246.61	CV1	C2	85x85	28 de #10	85	#5 en 6 ramas @10	#5 en 6 ramas @15
	OR 406x12.7	196.13	CV2						
	OR 406x9.5	149.00	CV3	V3	70x45	6 #8 4 #8 + 2 #6	140	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
0.25	OR 508x25.4	490.32	CV1	C3	80x80	20 de #10	80	#5 en 4 ramas @10	#5 en 4 ramas @15
	OR 457x25.4	438.51	CV2						
	OR 457x19.1	334.56	CV3						

Tabla 4.11. Resumen de diseño, $N = 10, \alpha = 0.75$

En la tabla 4.12 se indican las resistencias de los distintos sistemas. Se observa que para todas las relaciones β , las resistencias de las diagonales del sistema de contraventeo son suficientes, superando por mucho la resistencia máxima que el dispositivo histerético puede transmitir a la ductilidad máxima de diseño. Es claro entonces que el diseño de las diagonales está en función de la rigidez y no de la resistencia.

β	10 niveles			$\alpha = 0.75$		$V_D = 291.4\ t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n\ (t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	36.4	209.4	148.0	154.79	176.46	0.0502	0.0569	565.40	0.0629
	32.0	173.7	122.8						
	21.3	115.5	81.7						
0.75	36.4	274.6	194.2	110.28	145.40	0.0500	0.0530	420.03	0.0637
	32.0	226.9	160.4						
	21.3	173.7	122.8						
0.50	36.4	403.6	285.4	84.22	102.98	0.0484	0.0548	286.91	0.0644
	32.0	321.1	227.0						
	21.3	244.1	172.6						
0.25	36.4	814.5	576.0	84.22	102.98	0.0484	0.0548	286.91	0.0644
	32.0	723.6	511.6						
	21.3	552.6	390.7						

Tabla4.12. Resistencias de los sistemas, $N = 10, \alpha = 0.75$

A continuación se muestra una curva de capacidad típica (figura 4.21) para los modelos del caso I, donde se observa que la alta rigidez lateral del sistema total se mantiene prácticamente con poco cambio durante el análisis estático no lineal. El sistema disipador comienza a disipar energía con distorsiones de azotea menores que los casos II y III. Las columnas no forman articulaciones plásticas en ningún modelo durante los análisis no lineales. Las vigas forman articulaciones plásticas a distorsiones de azotea menores que los casos II y III.

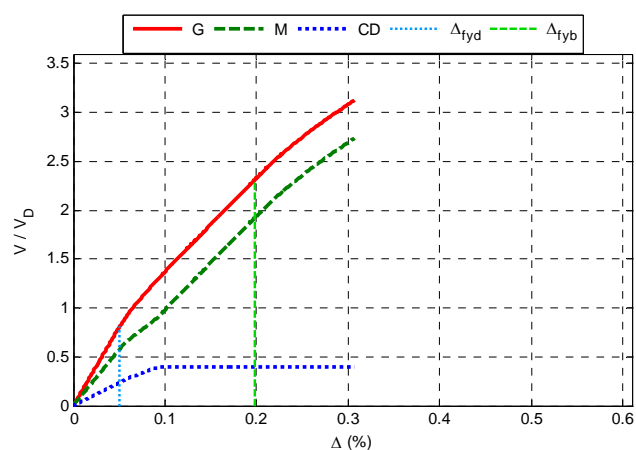


Figura 4.21. Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Con base en el estudio de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas como los de la figura 4.22, se puede establecer que la última sección del sistema gravitacional no sufre daños. Las columnas no forman articulaciones plásticas. Las vigas forman articulaciones plásticas; no obstante, el giro plástico en todos los casos es menor al 20% del giro plástico máximo. Los dispositivos histeréticos fluyen en todos los niveles y desarrollan ductilidades altas.

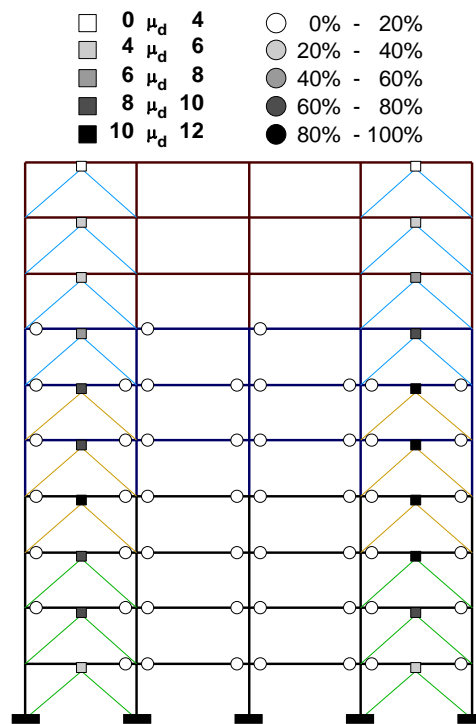


Figura 4.22. Mapeo de articulaciones fluencias inelásticas y plásticas,
 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO II ($\alpha = 0.5$) Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total

En la tabla 4.13 se reportan los aspectos más relevantes del diseño de los modelos $\alpha = 0.5$. El sistema gravitacional y el sistema de contraventeo tienen un tamaño intermedio entre los casos I y II. En los modelos $\beta = 0.25$, para la primera sección del sistema de contraventeo, se designaron dos secciones OR, las cuales estarían dispuestas una dentro de la otra para poder suministrar conjuntamente el área de acero requerida.

Como se observa en la tabla 4.14, las resistencias del sistema de contraventeo son suficientes para resistir las demandas de fuerza cortante por parte de los dispositivos histeréticos. Las resistencias del sistema gravitacional se encuentran entre los casos I y II.

10 Niveles $\alpha = 0.5$ $Peso = 9,279 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	Confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 457x12.7	225.7	CV1	V1	70x45	6 #10	140	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 356x12.7	170.32	CV2			4 #10 + 2 #8			
	OR 356x9.5	129.68	CV3	C1	80x80	24 de #10 + 4 #12	80	#5 en 6 ramas @10	#5 en 5 ramas @10
0.75	OR 457x15.8	280.54	CV1	V2	54x40	4 #10 + 2 #8	130	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 406x15.8	246.61	CV2			4 #10			
	OR 356x12.7	170.32	CV3						
0.50	OR 559x19.1	412.48	CV1	C2	75x75	28 de #10	75	#5 en 6 ramas @10	#5 en 6 ramas @15
	OR 559x15.8	345.41	CV2						
	OR 508x12.7	251.61	CV3			6 #8			
0.25	OR 762x19.1	819.19	CV1	V3	60x35	4 #8 + 2 #6	120	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 508x12.7		CV1						
	OR 711x25.4	696.57	CV2	C3	70x70	24 de #10	70	#5 en 4 ramas @10	#5 en 4 ramas @15
	OR 660x19.1	489.65	CV3						

Tabla 4.13. Resumen de diseño, $N = 10$, $\alpha = 0.5$

10 niveles $\alpha = 0.5$ $V_D = 309.3 t$									
β	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	77.3	373.1	263.8	132.59	143.79	0.0488	0.0552	407.30	0.0639
	68.0	274.6	194.2						
	45.3	209.4	148.0						
0.75	77.3	463.6	327.8	93.50	113.42	0.0483	0.0618	352.99	0.0648
	68.0	403.6	285.4						
	45.3	274.6	194.2						
0.50	77.3	688.6	486.9	70.48	80.90	0.0495	0.0628	280.44	0.0656
	68.0	576.8	407.9						
	45.3	418.9	296.2						
0.25	77.3	1378.6	974.9	70.48	80.90	0.0495	0.0628	280.44	0.0656
	68.0	1170.7	827.3						
	45.3	821.7	581.1						

Tabla 4.14. Resistencias de los sistemas, $N = 10$, $\alpha = 0.75$

La curva de capacidad típica para los modelos $\alpha = 0.5$ se presenta en la figura 4.23. La rigidez del sistema total se modifica significativamente una vez que los dispositivos histeréticos se comportan de manera no lineal. El sistema disipador fluye a una distorsión mayor que el caso I. Las vigas también fluyen a una distorsión de azotea mayor que en el caso I. Los mecanismos de disipación de energía son de acuerdo con la filosofía de diseño por capacidad.

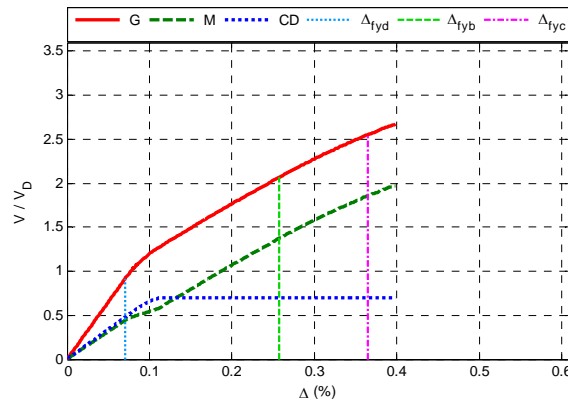


Figura 4.23. Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.24 se ilustra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.5$. La columna externa que está en flexotensión comienza a formar articulaciones plásticas en planta baja y en el primer nivel. Las vigas tienen un daño clasificado como insignificante. Los dispositivos histeréticos desarrollan ductilidades muy altas en todos los niveles, como se observa el mapeo de la figura 4.24

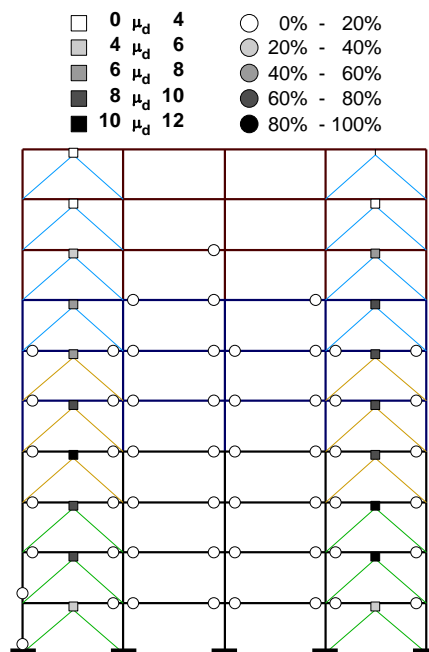


Figura 4.24. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO III ($\alpha = 0.25$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total

En la tabla 4.15 se observa que los modelos con $\beta = 0.25$ tienen áreas de acero muy grandes, que podrían poner en duda su factibilidad en términos constructivos. De hecho, para la primera sección de contravientos se necesitaría una sección cuadrada sólida de 35cm de lado, aproximadamente, de manera tal que sería de muy difícil ejecución la mencionada relación de rigidez. Las relaciones β restantes parecen ser perfectamente viables.

10 Niveles $\alpha = 0.25$ $Peso = 8,501 t$									
β	Sistema de contraviento			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 457x19.1	334.56	CV1	V1	60x35	4 #10	120	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @20
	OR 457x15.8	280.54	CV2			2 #10 + 2 #8			
	OR 356x12.7	170.32	CV3	C1	70x70	24 de #10	70	#5 en 4 ramas @5	#5 en 4 ramas @10
0.75	OR 457x25.4	438.51	CV1	V2	55x30	3 #10 + 2 #8	110	#3 en 3 ramas @10	#3 en 3 ramas @20
	OR 406x25.4	386.69	CV2			3 #8 + 2 #6			
	OR 406x15.8	246.61	CV3	C2	65x65	20 de #10	85	#5 en 4 ramas @10	#5 en 4 ramas @15
0.50	OR 660x25.4	644.75	CV1	V3	50x25	5 #8	100	#3 en 3 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 559x25.4	542.14	CV2			3 #8			
	OR 559x15.8	345.41	CV3	C3	60x60	16 de #10	80	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
0.25	OR 711x25.4 OR 559x25.4	1238.71	CV1	V3	50x25	5 #8 3 #8	100	#3 en 3 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 660x25.4 OR 508x19.1	1018.27	CV2			16 de #10			
	OR 559x15.8 OR 457x19.1	679.97	CV3	C3	60x60	16 de #10	80	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15

Tabla 4.15. Resumen de diseño, $N = 10, \alpha = 0.25$

En cuanto a las resistencias reportadas en la tabla 4.16, podemos mencionar que el sistema gravitacional para los modelos del caso III tiene las resistencias menores de los tres casos en comparación. En contraparte, los giros plásticos máximos son los mayores de los tres casos.

β	10 niveles			$\alpha = 0.25$		$V_D = 340.0\ t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	127.5	552.6	390.7	70.48	83.20	0.0532	0.0598	281.20	0.0738
	112.1	463.6	327.8						
	74.8	274.6	194.2						
0.75	127.5	723.6	511.6	50.60	71.57	0.0585	0.0726	215.53	0.0842
	112.1	631.4	446.5						
	74.8	403.6	285.4						
0.50	127.5	644.8	764.9	34.00	49.08	0.0566	0.0702	159.21	0.0763
	112.1	542.1	639.7						
	74.8	345.4	407.9						
0.25	127.5	2081.9	1472.1	34.00	49.08	0.0566	0.0702	159.21	0.0763
	112.1	1708.5	1208.1						
	74.8	1135.5	802.9						

Tabla4.16. Resistencias de los sistemas, $N = 10, \alpha = 0.25$

Del análisis de las curvas de capacidad global de los modelos $\alpha = 0.25$, se puede mencionar que la rigidez inicial del sistema gravitacional se modifica debido a la formación de articulaciones plásticas en la columna externa. La distorsión de fluencia de los dispositivos histeréticos es la mayor de los tres casos. Las vigas comienzan la formación de articulaciones plásticas a una distorsión menor de los tres casos en comparación. Se observa que pese a que las distorsiones de fluencia tanto de vigas como columnas disminuye, los principios de la filosofía de diseño por capacidad se cumplen. En la figura 4.25 se presenta una curva de capacidad típica de los modelos $\alpha = 0.25$.

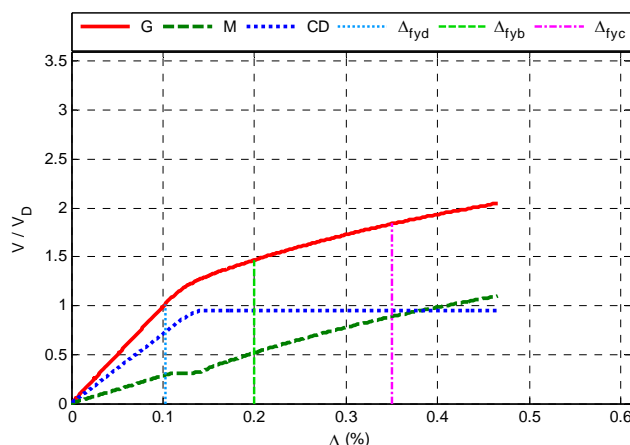


Figura 4.25. Curva de capacidad global, $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.26 se presenta un mapeo típico de los modelos $\alpha = 0.25$. Los dispositivos histeréticos alcanzan ductilidades entre seis y diez en la mayoría de los entrepisos, y en el último entrepiso permanece elástico. Las vigas forman articulaciones plásticas en la mayoría de los niveles, a excepción de los últimos dos niveles. La única columna que sufre daño es la externa que se encuentra en flexotensión. En la medida que aumenta la relación β , el daño se propaga a los pisos superiores.

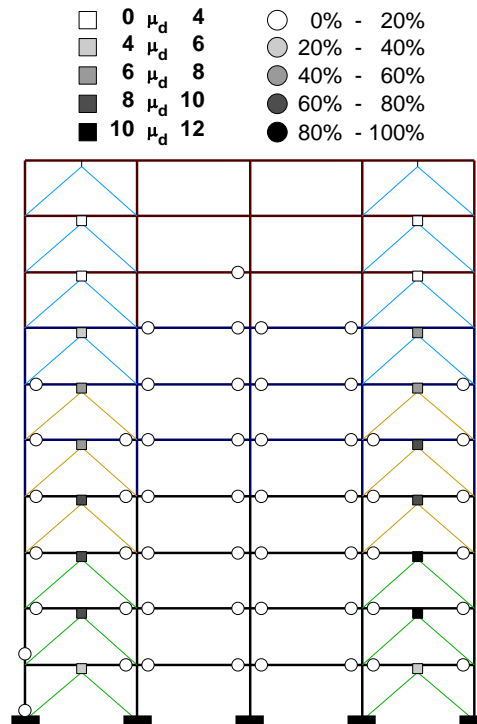


Figura 4.26. Mapeo fluencias inelásticas y de articulaciones plásticas, $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

4.5.1. Observaciones generales de los modelos de 10 niveles

Los modelos que presentan mayor ductilidad y sobrerresistencia de cada caso de estudio se reportan en las figuras de esta sección. Los modelos correspondientes son; $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$; $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$ y $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$. Los resultados completos de los modelos de diez niveles se incluyen en el Apéndice A.

4.5.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales

En las tablas 4.17, 4.18 y 4.19 se observa que los resultados siguen un patrón donde los valores de ductilidad (factor de comportamiento sísmico, Q) y sobrerresistencia (factor de reducción por sobrerresistencia, R) se incrementan en la medida que aumenta la relación de rigidez β y la pendiente post-fluencia K_2 , debido los mismos factores mencionados para los modelos de cinco niveles. Los periodos fundamentales elásticos presentan la misma variación que en los modelos de cinco niveles y se debe de igual manera a las razones expuestas para los modelos de cinco niveles.

10 Niveles $\alpha = 0.75$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	4.05	6.57	4.25	6.74	4.38	6.85	0.6298
0.75	4.34	7.27	4.54	7.42	4.68	7.53	0.6228
0.50	4.49	7.75	4.67	7.86	4.79	7.93	0.6202
0.25	4.77	8.40	4.98	8.52	5.10	8.60	0.6058

Tabla 4.17. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 10, \alpha = 0.75$

10 Niveles $\alpha = 0.5$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.04	6.12	3.28	6.32	3.45	6.46	0.6531
0.75	3.14	6.70	3.41	6.90	3.55	6.97	0.6446
0.50	3.22	7.04	3.48	7.26	3.65	7.37	0.6384
0.25	3.33	7.53	3.58	7.68	3.75	7.84	0.6279

Tabla 4.18. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 10, \alpha = 0.5$

10 Niveles $\alpha = 0.25$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	2.08	4.92	2.34	5.10	2.50	5.23	0.6896
0.75	2.11	5.22	2.37	5.34	2.53	5.44	0.6800
0.50	2.14	5.40	2.40	5.56	2.56	5.65	0.6753
0.25	2.19	5.72	2.44	5.82	2.60	5.92	0.6700

Tabla 4.19. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 10, \alpha = 0.25$

Los resultados presentados en las tablas 4.18, 4.19 y 4.20 dan un intervalo de valores que se pueden tomar como indicadores para el análisis estático lineal de un sistema genérico. La razón por la cual los modelos del caso I desarrollan ductilidades globales más grandes es debido a la forma en que se calcula el valor, ya que se mide a partir de que el primer dispositivo histerético

entra en estado plástico. Los modelos del caso I, a pesar de que desarrollan las ductilidades más grandes, sus distorsiones máximas de azotea son las menores de los tres casos. En contraparte, en los modelos del caso III se calcularon las menores ductilidades, pero las distorsiones máximas de azotea son las más grandes.

4.5.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador

Del análisis de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de todos los casos de estudio, como los que se presentan en la figura 4.27, se establece:

- Los modelos con mayor daño en el sistema gravitacional corresponden al caso III.
- Los modelos con un daño intermedio en el sistema gravitacional corresponden al caso II.
- Los modelos con el menor daño al sistema gravitacional corresponden al caso I.

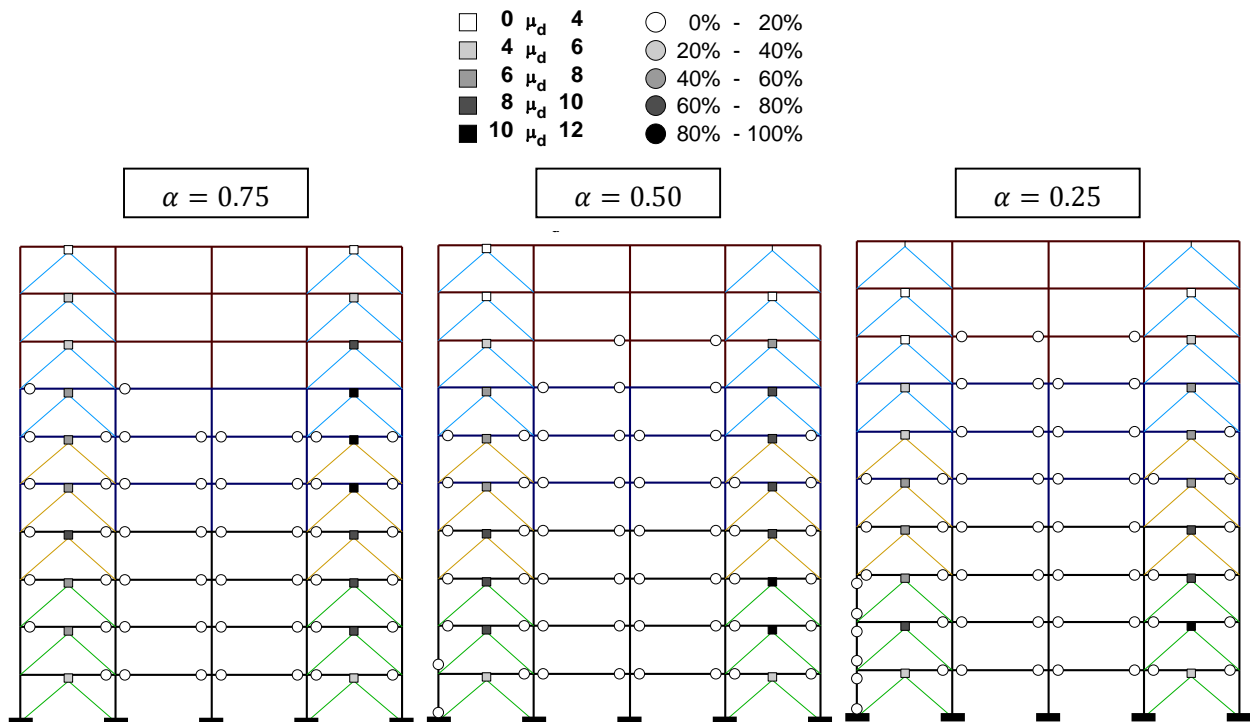


Figura 4.27. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 10$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Se observa que en todos los conjuntos α , los disipadores se dañan primero, a continuación las vigas y, por último, hay daño en una columna externa. Se cumple perfectamente la filosofía de diseño por capacidad. Del estudio de las curvas de capacidad global, como las mostradas en la figura 4.28, se establecen las mismas observaciones en cuanto al desempeño de las distintas relaciones α , expuestos para los modelos de cinco niveles.

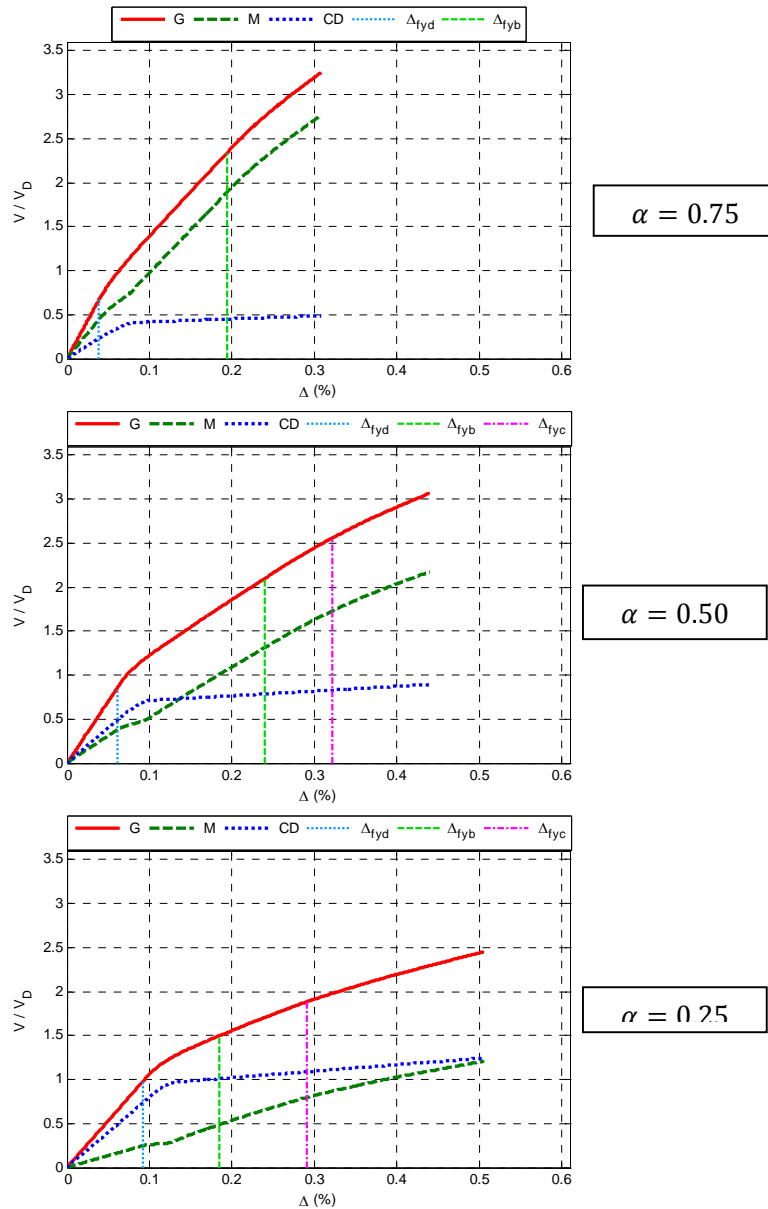


Figura 4.28. Curva de capacidad modelos. $N = 10, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Los cortantes de diseño con respecto a los cuales están normalizadas las curvas de capacidad son:

- Caso I ($\beta = 0.75$) $V_D = 291.4 t$
- Caso II ($\beta = 0.5$) $V_D = 309.3 t$
- Caso III ($\beta = 0.25$) $V_D = 340.0 t$

En las curvas que se muestran en la figura 4.29 se aprecia que, en los niveles inmediatos superiores al cambio de sección del sistema gravitacional, la relación de rigidez aumenta, es decir, la rigidez del sistema disipador aumenta y la rigidez del sistema gravitacional disminuye. Las curvas de capacidad varían en la magnitud del cortante conforme aumenta en altura la estructura.

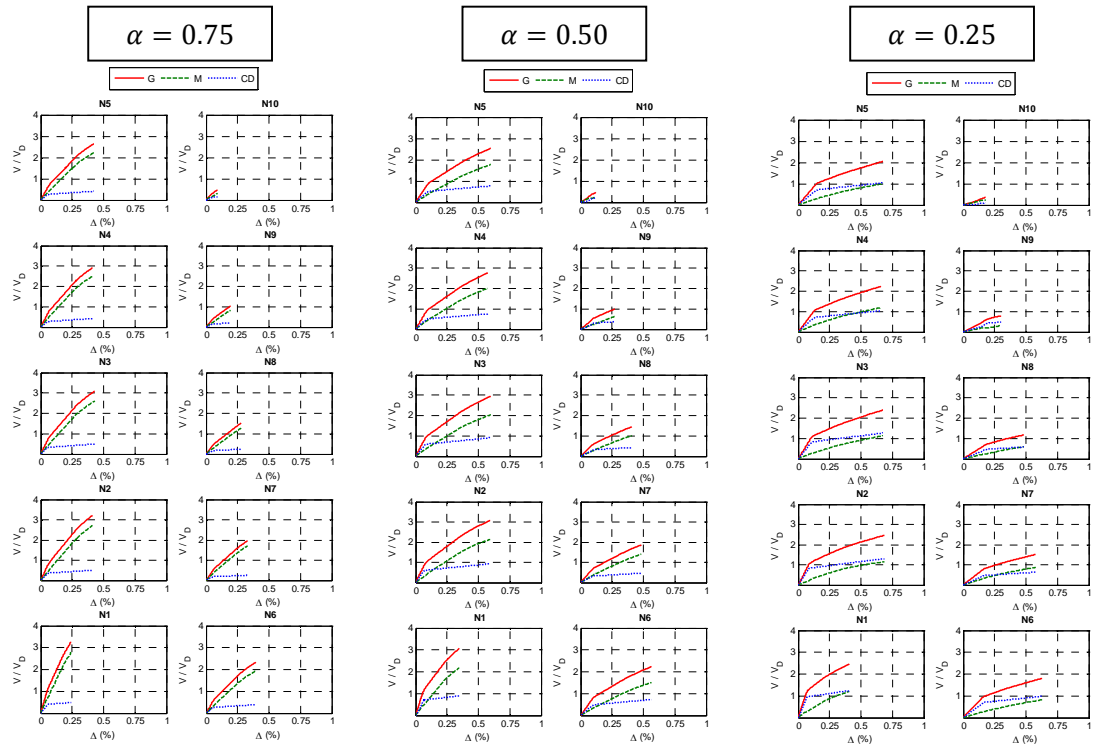


Figura 4.29. Curvas de capacidad por entrepisos modelo, $N = 10$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Las observaciones en cuanto a las distorsiones de entrepiso del sistema total que ocasionan que los dispositivos histeréticos comiencen a disipar energía y la distorsión en la cual alcanzan su ductilidad objetivo (figura 4.30), son las mismas que se hicieron para los modelos de cinco niveles.

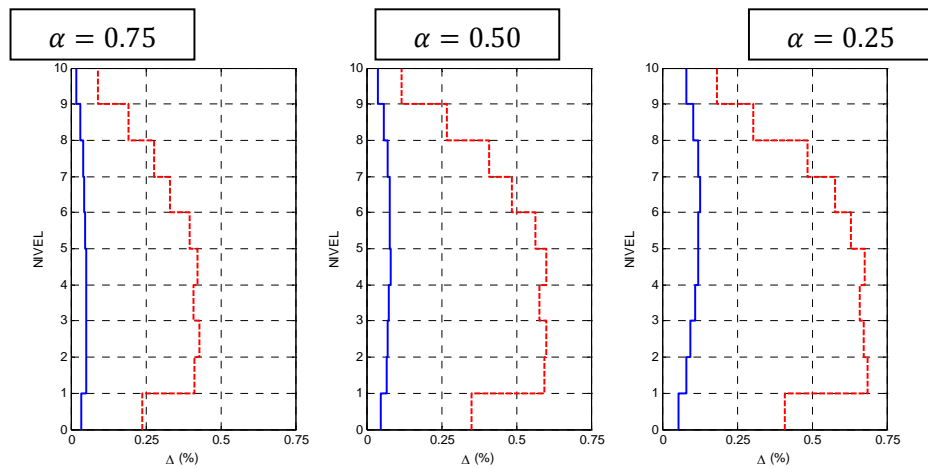


Figura 4.30. Envolventes de distorsiones de entrepisos. $N = 10$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

De acuerdo con nuestros objetivos de diseño planteados, la relación $\alpha = 0.25$ es el que tiene el mejor desempeño, pese a que se formaron un número ligeramente mayor de articulaciones plásticas en el sistema gravitacional. Es el sistema que disipa una cantidad de energía mucho mayor.

4.5.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador

Los corolarios presentados para los modelos de cinco niveles en cuanto al efecto de las distintas relaciones de rigidez entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo (β) son válidos para los modelos de diez niveles. Estos efectos se magnifican o minimizan en función de la relación de rigidez entre el sistema disipador y el sistema gravitacional (α), es decir, estos cobran importancia a medida que el sistema disipador aporta mayor rigidez, y decrecen cuando el sistema disipador aporta una menor rigidez con respecto al sistema gravitacional.

La relación de rigidez β , influye en el nivel de distorsión de entrepiso a la cual los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía. A una mayor relación de rigidez (β menor), se reduce la distorsión a la que los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía y, por tanto, la distorsión última de entrepiso es menor. También influye en el nivel de daño en el sistema gravitacional, debido a que a medida que aumenta la relación de rigidez, el dispositivo disminuye su rigidez.

4.5.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador

Con base en el estudio de las curvas de capacidad, mapeos de articulaciones plásticas y envolventes de distorsión obtenidos de los modelos de diez niveles, se pueden establecer los mismos criterios respecto a las relaciones de resistencia que los señalados para los modelos de cinco niveles.

4.5.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d

En las figuras 4.31, 4.32 y 4.33 se ilustran las curvas de capacidad de los dispositivos histeréticos para los tres casos que se vienen presentando. En términos generales los dispositivos histeréticos fueron demandados en mayor medida del segundo entrepiso al octavo entrepiso, la demanda de ductilidad disminuye para los dos últimos entrepisos. En el primer nivel la demanda de ductilidad por parte de los disipadores es menor en comparación con el segundo nivel; esto presumiblemente se debe a que los apoyos se consideran rígidos (apoyos empotrados), lo que trae como consecuencia menores niveles de distorsión.

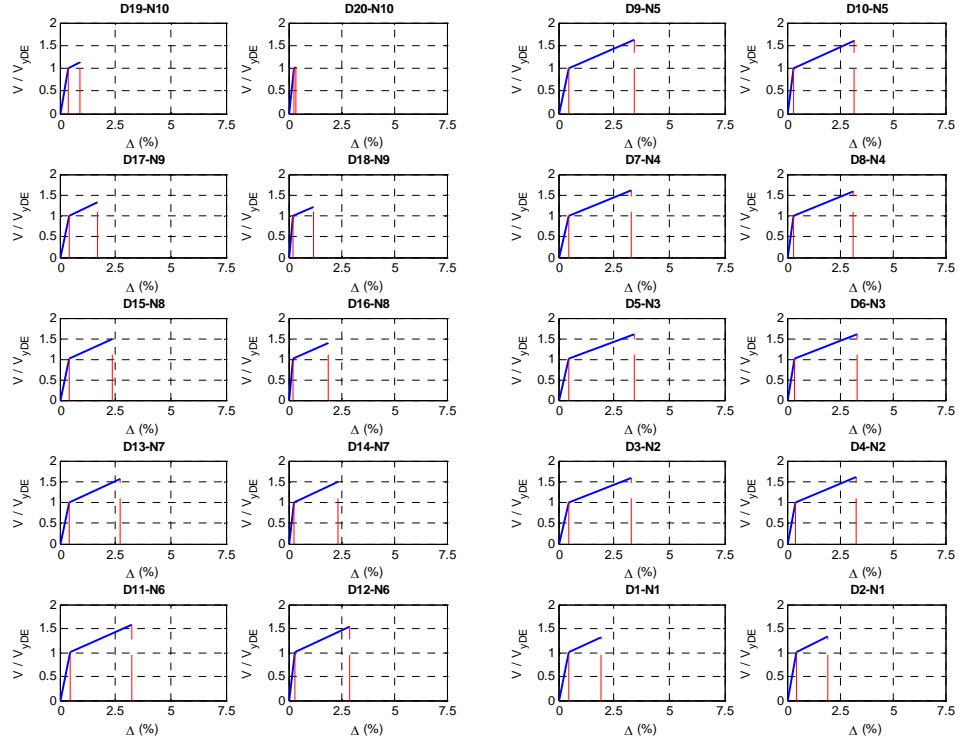


Figura 4.31. Curvas de capacidad de los disipadores $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

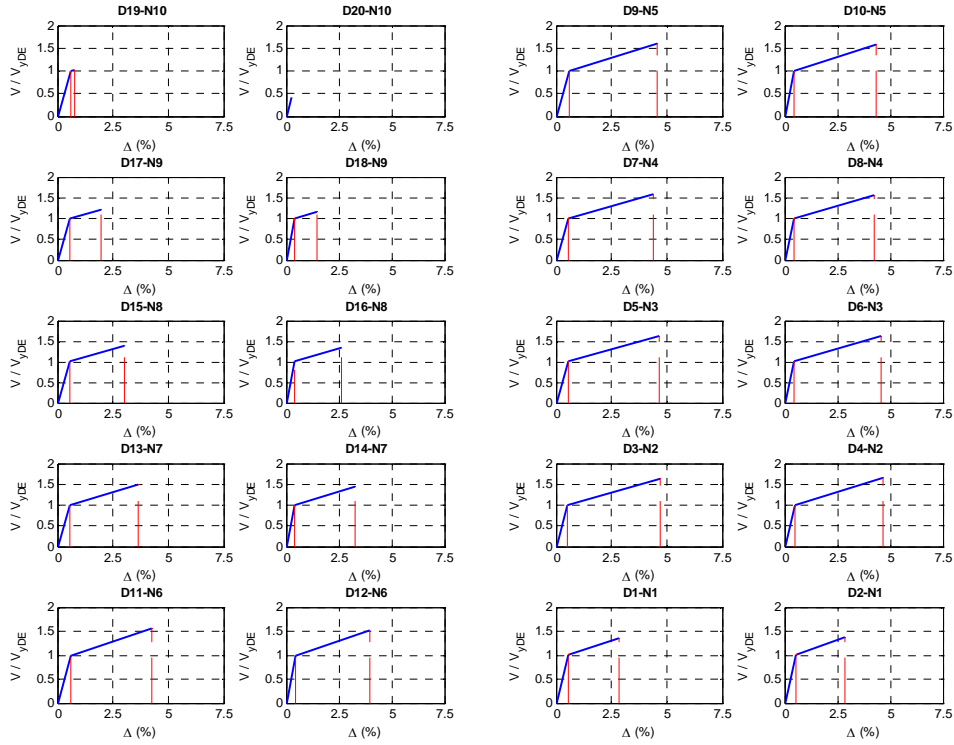


Figura 4.32. Curvas de capacidad de los disipadores $N = 10, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

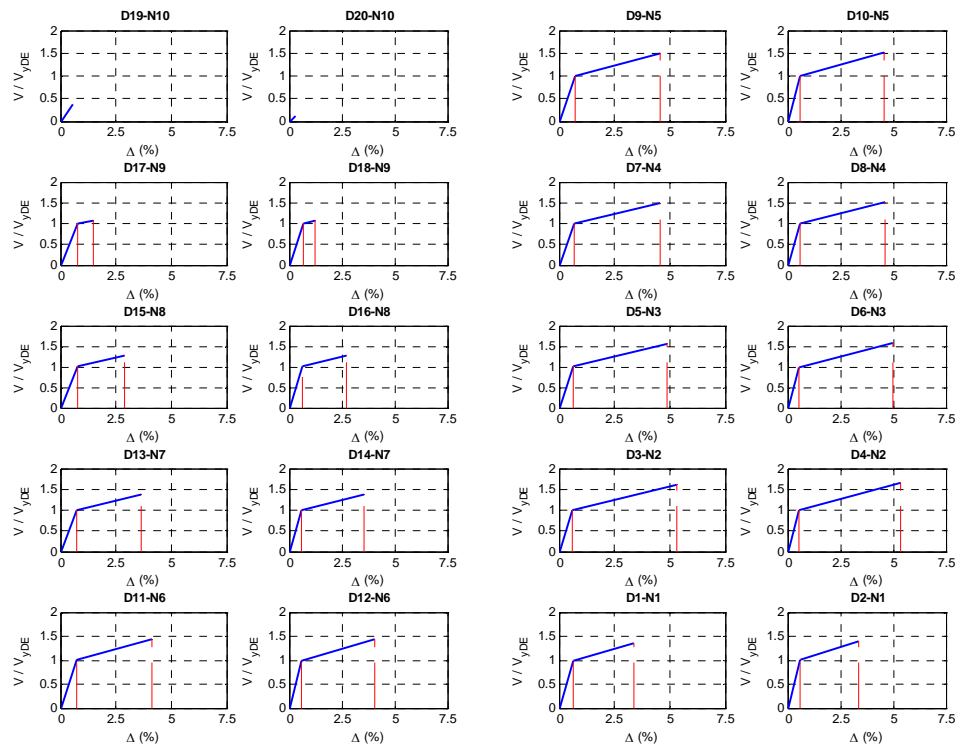


Figura 4.33. Curvas de capacidad de los disipadores $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

4.5.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de servicio aquéllos que no le provoquen daño al sistema gravitacional:

- Caso I distorsiones menores al 0.20%
- Caso II distorsiones menores al 0.24%
- Caso III distorsiones menores al 0.19%

Es importante recordar que estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados; sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.5.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de seguridad de operación aquéllos que lleven a los dispositivos histeréticos a su ductilidad máxima permitida ($\mu_d = 10$).

- Caso I distorsiones menores al 0.30%
- Caso II distorsiones menores al 0.32%
- Caso III distorsiones menores al 0.29%

Es importante recordar que estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados; sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.6. Modelos de 15 Niveles

En el diseño de los modelos de quince niveles resulta muy complicado proponer un sistema gravitacional que sea lo suficientemente capaz de resistir los efectos tan grandes de la acumulación de fuerza axial a tensión y compresión, producto de la interacción con el sistema disipador y simultáneamente la rotación del marco, es decir, los efectos de la flexotensión y flexocompresión en columnas externas. Esto conlleva a proponer columnas con resistencias muy grandes a flexión que presentan serias complicaciones para cumplir con los requisitos de marcos dúctiles de las NTCC 2004, en relación con los límites que establece el reglamento para la fuerza cortante de diseño (sección 2.5.2.4 de las NTCC-2004). Adicionalmente, la factibilidad constructiva de algunas relaciones se complica seriamente.

Todos los modelos de quince niveles se diseñaron con el mismo sistema gravitacional, de manera tal que el único parámetro que varía es el sistema disipador (diagonales y dispositivos) para cada uno de los modelos. La ductilidad objetivo del dispositivo histerético con la que se diseñó el sistema disipador de todos los modelos de quince niveles fue de 10 ($\mu_d = 10$). A continuación se presentan los detalles de cada caso.

CASO I ($\alpha = 0.75$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total

Los modelos del caso I (tabla 4.20), están diseñados con perfiles se pueden encontrar en el mercado de perfiles de acero o pueden fabricarse con placas de acero. El sistema gravitacional es relativamente esbelto si se compara con la altura total de la estructura que es de 60m.

15 Niveles $\alpha = 0.75$ $Peso = 16,558 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 356x12.7	170.32	CV1	V1	90x55	10 #10	180	#3 en 4 ramas @5	#3 en 4 ramas @10
	OR 305x12.7	144.52	CV2			8 #10			
	OR 305x9.5	110.32	CV3						
	OR 254x7.9	76.77	CV4	C1	105x105	52 de #10	105	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
0.75	OR 457x12.7	225.7	CV1	V2	85x50	10 #10	170	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @10
	OR 356x12.7	170.32	CV2			8 #10			
	OR 305x12.7	144.52	CV3						
	OR 305x9.5	110.32	CV4						
0.50	OR 457x19.1	389.9	CV1	C2	100x100	48 de #10	85	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	OR 457x15.8	327.1	CV2						
	OR 457x12.7	263.3	CV3	V3	80x45	8 #10	160	#3 en 4 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 406x9.5	172.2	CV4			6 #10			
0.25	OR 660x25.4	644.8	CV1	C3	95x95	40 de #10	80	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	OR 559x25.4	542.1	CV2						
	OR 508x19.1	373.5	CV3						
	OR 406x19.1	295.6	CV4						

Tabla 4.20. Resumen de diseño, $N = 15$, $\alpha = 0.75$

En la tabla 4.21 se indican las resistencias de los distintos sistemas. Se observa la enorme capacidad a flexión con la que fueron diseñadas las columnas, esto trae consigo la consecuencia de suministrar resistencias a fuerza cortante que exceden los límites impuestos por las NTCC 2004 para el diseño y construcción de marcos dúctiles.

β	15 niveles $\alpha = 0.75$ $V_D = 473.1 t$								
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n(t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	59.1	273.5	193.4	258.23	295.10	0.0581	0.0654	953.42	0.0704
	53.7	225.5	159.5						
	40.1	172.7	122.1						
	18.9	114.5	80.9						
0.75	59.1	372.4	263.3	241.30	266.78	0.0577	0.0696	831.05	0.0710
	53.7	273.5	193.4						
	40.1	225.5	159.5						
	18.9	172.7	122.1						
0.50	59.1	551.4	389.9	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	53.7	462.6	327.1						
	40.1	372.4	263.3						
	18.9	243.5	172.2						
0.25	59.1	1081.0	764.4	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	53.7	903.6	639.0						
	40.1	620.0	438.4						
	18.9	482.0	340.8						

Tabla4.21. Resistencias de los sistemas, $N = 15, \alpha = 0.75$

En la figura 4.34 se presenta una curva de capacidad que ilustra el comportamiento característico de los modelos $\alpha = 0.75$. La rigidez final del sistema gravitacional se reduce de manera importante. El sistema disipador fluye a distorsiones de azotea similares a los casos II y III. Se observa en todos los modelos del caso I, que los mecanismos de disipación de energía concuerdan con la filosofía de diseño por capacidad. Por consiguiente, los primeros elementos en dañarse son los dispositivos histeréticos y las diagonales del sistema de contraventeo permanecen elásticas, a continuación se dañan las vigas y por último las columnas se dañan.

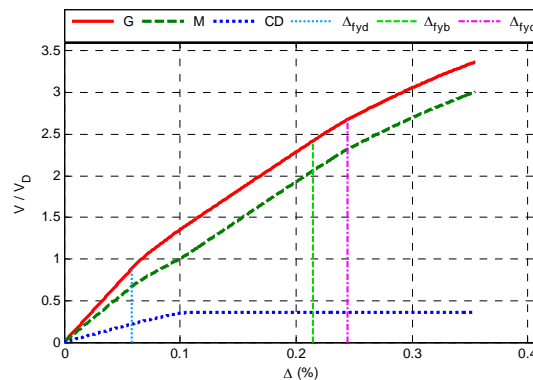


Figura 4.34. Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.35 se presenta un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.50$, los cuales tienen el mayor número de articulaciones plásticas de las tres relaciones α . La variación del parámetro β no tiene un efecto en la formación de articulaciones plásticas, es decir, los mapeos equiparables (conjuntos con pendiente post-fluencia igual) son prácticamente iguales. Las ductilidades desarrolladas por los dispositivos histeréticos están en el intervalo de seis a diez para la mayoría de los entrepisos.

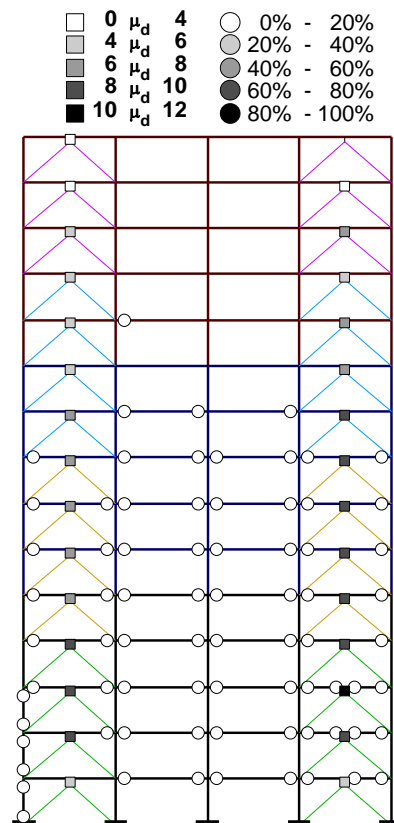


Figura 4.35. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas,
 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO II ($\alpha = 0.5$) Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total

En la tabla 4.22 se reportan los aspectos más relevantes del diseño de los modelos $\alpha = 0.5$. En los modelos con la relación $\beta = 0.25$ no se especifican secciones de las diagonales de contraventeo. Esto se debe a la dificultad para proporcionar el área de acero mediante un conjunto de secciones OR. El área de acero requerida es demasiado grande para ser una opción viable en términos constructivos. Por consiguiente, se optó por no dar una solución a esta cuestión de ingeniería de detalle, indicando únicamente las áreas de acero necesarias.

15 Niveles $\alpha = 0.50$ $Peso = 16,558 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.0	OR 660x19.1	489.65	CV1	V1	90x55	10 #10	180	#3 en 4 ramas @5	#3 en 4 ramas @10
	OR 559x19.1	412.48	CV2			8 #10			
	OR 508x15.8	312.98	CV3						
	OR 457x12.7	225.7	CV4	C1	105x105	52 de #10	105	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
0.75	OR 660x25.4	644.75	CV1	V2	85x50	10 #10	170	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @10
	OR 559x25.4	542.14	CV2			8 #10			
	OR 559x19.1	412.48	CV3						
	OR 508x15.8	312.98	CV4						
0.50	OR 711x25.4 OR 508x12.7	948.18	CV1	C2	100x100	48 de #10	85	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	OR 711x19.1 OR 508x12.7	780.22	CV2						
	OR 660x25.4	644.75	CV3	V3	80x45	8 #10	160	#3 en 4 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	OR 601x19.1	444.57	CV4			6 #10			
0.25	-	1859.58	CV1	C3	95x95	40 de #10	80	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	-	1541.61	CV2						
	-	1190.21	CV3						
	-	900.82	CV4						

Tabla 4.22. Resumen de diseño, $N = 15$, $\alpha = 0.5$

Las resistencias de los modelos $\alpha = 0.5$ se reportan en la tabla 4.23, recordando que lo único que varía es el sistema disipador, las mismas observaciones hechas en el caso I son válidas para este conjunto.

β	15 niveles			$\alpha = 0.50$		$V_D = 551.9 t$			
	sistema disipador			sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n(t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m))	θ_p
1.00	138.0	821.2	580.6	258.23	295.10	0.0581	0.0654	953.42	0.0704
	125.3	687.9	486.4						
	93.5	519.5	367.4						
	44.0	372.4	263.3						
0.75	138.0	1081.0	764.4	241.30	266.78	0.0577	0.0696	831.05	0.0710
	125.3	903.6	639.0						
	93.5	687.9	486.4						
	44.0	519.5	367.4						
0.50	138.0	1592.6	1126.2	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	125.3	1310.8	926.9						
	93.5	1081.0	764.4						
	44.0	743.4	525.7						
0.25	138.0	3127.7	2211.6	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	125.3	2592.9	1833.5						
	93.5	2001.9	1415.5						
	44.0	1515.1	1071.4						

Tabla4.23. Resistencias de los sistemas, $N = 15, \alpha = 0.5$

La curva de capacidad típica para los modelos $\alpha = 0.5$ se presenta en la figura 4.36. La observación más importante es el hecho de que las columnas fluyan antes que las vigas y, en consecuencia, incumpliendo la filosofía de diseño por capacidad. Las vigas fluyen a una distorsión de azotea parecida al caso I.

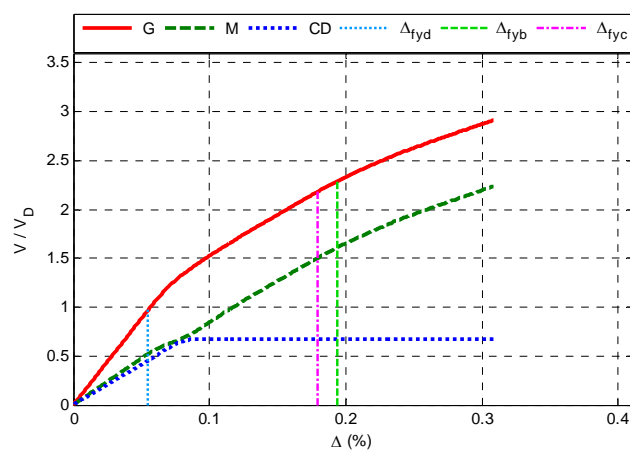


Figura 4.36. Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Con base en el estudio de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas (figura 4.37) de los modelos $\alpha = 0.5$, se observa que los mapeos de articulaciones plásticas para los modelos equiparables (iguales parámetros α y K_2), son prácticamente iguales. No hay una diferencia significativa en los mapeos conforme el parámetro β disminuye. Las ductilidades desarrolladas por los dispositivos histeréticos están en el intervalo de cuatro a diez para la mayoría de los entrepisos.

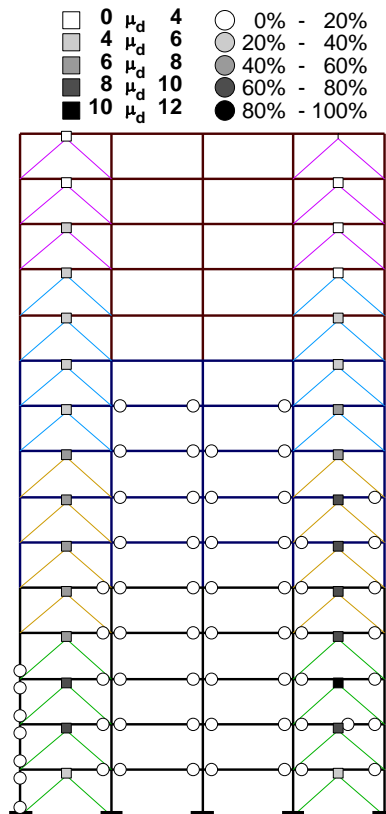


Figura 4.37. Mapeo fluencias inelásticas y de articulaciones plásticas,
 $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO III ($\alpha = 0.25$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total.

Es sumamente complicado implantar la relación de rigidez $\alpha=0.25$, las áreas de acero requeridas (tabla 4.24) son enormes. Como ejemplo, en la relación mínima ($\beta = 1.0$) se requiere una sección transversal sólida de 38 x 38 cm, para satisfacer la relación de rigidez. En el peor de los casos ($\beta = 0.25$) se necesita una sección de aproximadamente 75 x 75 cm. En las relaciones que no se designan secciones OR, es debido a que no son viables de diseñar y construir.

15 Niveles $\alpha = 0.25$ $Peso = 16,558 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	$h \times b$	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	OR 762x25.4 OR 711x25.4	1444.96	CV1	V1	90x55	10 #10	180	#3 en 4 ramas @5	#3 en 4 ramas @10
	OR 762x25.4 OR 660x19.1	1238.04	CV2			8 #10			
	OR 660x25.4 OR 508x15.8	957.73	CV3						
	OR 601x25.4 OR 356x9.5	714.49	CV4	C1	105x105	52 de #10	105	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
0.75	-	1950.3	CV1	V2	85x50		170	#3 en 4 ramas @10	#3 en 4 ramas @10
	-	1616.82	CV2			10 #10			
	-	1248.28	CV3			8 #10			
	-	944.77	CV4						
0.50	-	2857.42	CV1	C2	100x100	48 de #10	85	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	-	2368.84	CV2						
	-	1828.88	CV3	V3	80x45	8 #10	160	#3 en 4 ramas @10	#3 en 2 ramas @10
	-	1384.2	CV4			6 #10			
0.25	-	5578.77	CV1	C3	95x95		80	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	-	4624.87	CV2						
	-	3570.66	CV3			40 de #10			
	-	2702.48	CV4						

Tabla 4.24. Resumen de diseño, $N = 15$, $\alpha = 0.25$

En la tabla 4.25 se reportan las resistencias de los modelos del caso III, el cual comparte el mismo sistema gravitacional con el resto de los casos y el sistema disipador, como se observa, es poco viable.

β	15 niveles			$\alpha = 0.25$		$V_D = 662.3\ t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n(t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	248.4	2430.3	1718.5	258.23	295.10	0.0581	0.0654	953.42	0.0704
	225.5	2082.3	1472.4						
	168.3	1605.7	1135.4						
	79.2	1194.4	844.6						
0.75	248.4	3280.3	2319.5	241.30	266.78	0.0577	0.0696	831.05	0.0710
	225.5	2719.4	1922.9						
	168.3	2099.5	1484.6						
	79.2	1589.0	1123.6						
0.50	248.4	4806.0	3398.4	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	225.5	3984.2	2817.3						
	168.3	3076.1	2175.1						
	79.2	2328.1	1646.2						
0.25	248.4	9383.2	6634.9	171.72	204.11	0.0567	0.0637	660.00	0.0634
	225.5	7778.8	5500.4						
	168.3	6005.6	4246.6						
	79.2	4545.4	3214.1						

Tabla4.25. Resistencias de los sistemas, $N = 15, \alpha = 0.25$

El comportamiento de las curvas de capacidad de los modelos del caso III (figura 4.38), no es satisfactorio por las razones siguientes: a) las distorsiones finales son bajas, b) los principios del diseño por capacidad no se cumplen y, c) el sistema gravitacional se daña a distorsiones menores que los casos I y II.

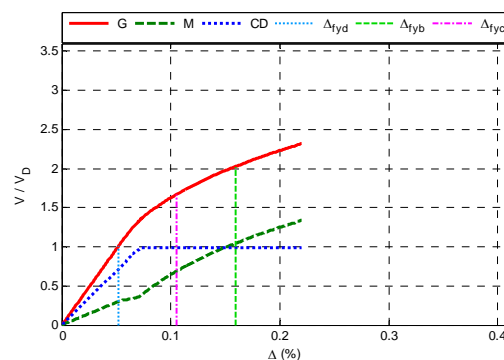
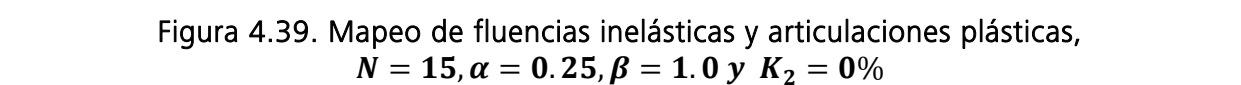


Figura 4.38. Curva de capacidad global, $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.39 se muestra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.25$. Los modelos del caso III mostraron la menor formación de articulaciones plásticas en el sistema gravitacional. Los dispositivos histeréticos desarrollan

□ 0 ■ 4 ○ 0% - 20%



15 Niveles						$\alpha = 0.75$	
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		Periodo elástico
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.82	6.09	3.90	6.13	3.99	6.17	0.8675
0.75	3.99	6.45	4.08	6.47	4.15	6.51	0.8642
0.50	4.15	6.98	4.24	7.00	4.31	7.02	0.8526
0.25	4.36	7.46	4.47	7.47	4.51	7.48	0.8475

Tabla 4.26. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 15, \alpha = 0.75$

15 Niveles $\alpha = 0.5$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.00	5.61	3.13	5.68	3.23	5.75	0.7788
0.75	3.08	5.88	3.22	5.96	3.31	6.04	0.7729
0.50	3.17	6.22	3.32	6.33	3.41	6.39	0.7668
0.25	3.30	6.62	3.43	6.68	3.52	6.73	0.7603

Tabla 4.27. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 15, \alpha = 0.5$

15 Niveles $\alpha = 0.25$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	2.29	4.21	2.44	4.34	2.53	4.43	0.7121
0.75	2.31	4.31	2.47	4.43	2.56	4.53	0.7083
0.50	2.36	4.45	2.51	4.58	2.60	4.66	0.7052
0.25	2.40	4.62	2.55	4.47	2.64	4.82	0.7017

Tabla 4.28. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 15, \alpha = 0.25$

Los modelos de quince niveles son poco susceptibles al parámetro β , contrario a los modelos de cinco y diez niveles. El parámetro β afecta en mayor medida a la relación $\alpha = 0.75$, disminuye para la relación $\alpha = 0.5$, y la influencia para la relación $\alpha = 0.25$ es mínima.

4.6.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador

Del análisis de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de todos los casos de estudio, como los que se presentan en la figura 4.40, se establece:

- Los modelos con mayor daño en el sistema gravitacional corresponden al caso I.
- Los modelos con un daño intermedio en el sistema gravitacional corresponden al caso II.
- Los modelos con el menor daño al sistema gravitacional corresponden al caso III.

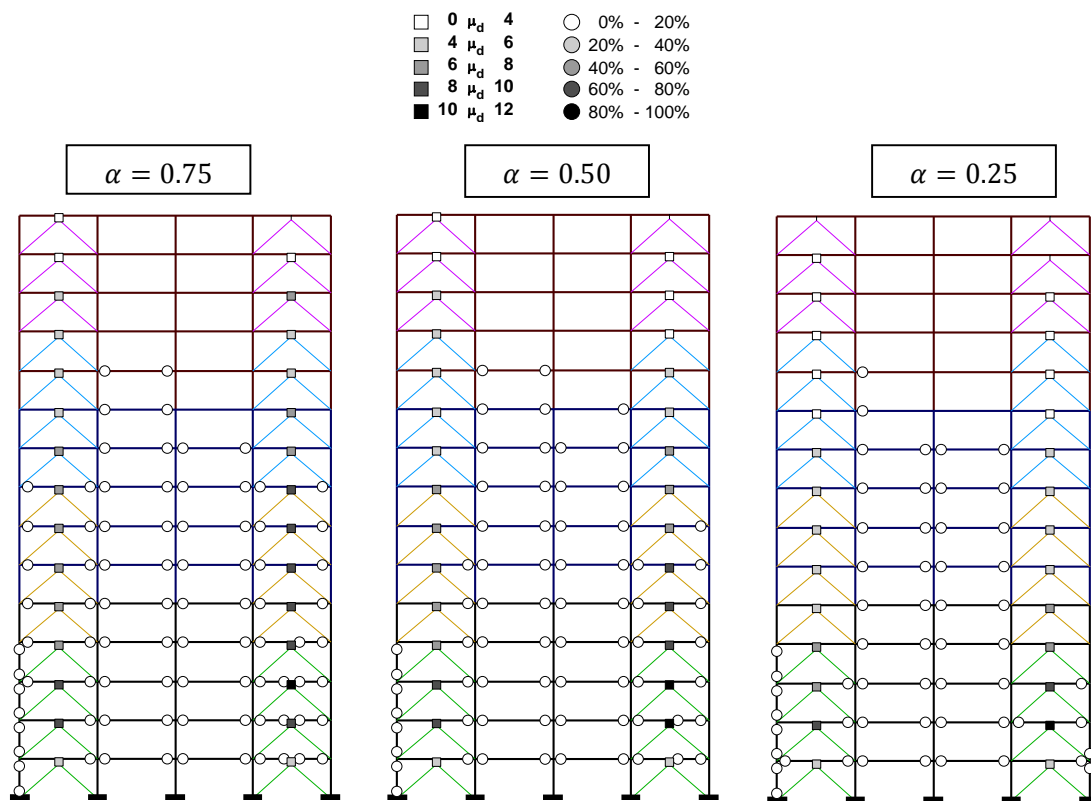


Figura 4.40. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas,
 $N = 15$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Del análisis conjunto de los mapeos (figura 4.40), curvas de capacidad global (figura 4.41) y envolventes de distorsión por entrepiso (figura 4.42) se establece lo siguiente:

- Para el caso I. No se aprecia un incremento significativo en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, es decir, si el sistema gravitacional fuese el único sistema sismorresistente, la curva de capacidad sería muy similar. No obstante, los principios de diseño por capacidad se cumplen pero las distorsiones máximas para el estado límite de diseño operacional tendrían que reducirse hasta el inicio de formación de articulaciones plásticas en las columnas para evitar mecanismos indeseables.
- Para el caso II. Se aprecia un incremento en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, pero los mecanismos de disipación de energía no van de acuerdo a los principios de diseño por capacidad y las distorsiones de fluencia de vigas y columnas se ven disminuidas.
- Para el caso III. se aprecia un incremento en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, Sin embargo, el comportamiento de los modelos es totalmente indeseable por las siguientes razones: a) las distorsiones finales son bajas, b) los principios del diseño por capacidad no se cumplen, c) el sistema gravitacional se daña a distorsiones mucho menores que los casos I y II y, d) el sistema gravitacional se daña de manera indeseable, formando mecanismos de articulaciones plásticas dobles en columnas, formación de articulaciones plásticas en flexocompresión y peor aún articulaciones plásticas en todos los elementos que llegan a un nodo.

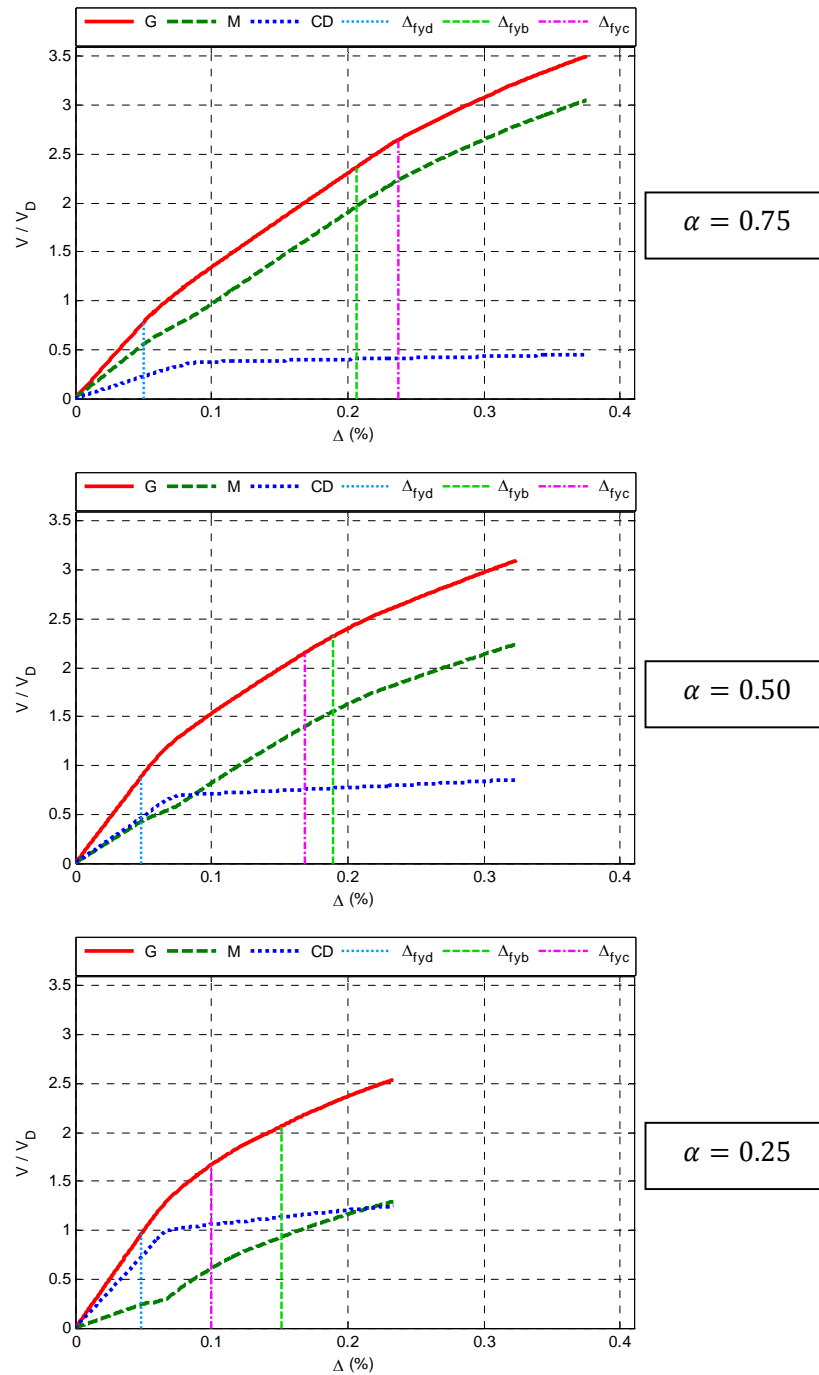


Figura 4.41 Curva de capacidad modelos. $N = 15, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Los cortantes de diseño con respecto a los cuales están normalizadas las curvas de capacidad son:

- Caso I ($\beta = 0.75$) $V_D = 473.0 t$
- Caso II ($\beta = 0.5$) $V_D = 551.0 t$
- Caso III ($\beta = 0.25$) $V_D = 662.0 t$

En las figuras 4.42, 4.43 y 4.44 se presentan las curvas de capacidad por entrepisos para los modelos que se vienen mostrando. Se observa que en todos los entrepisos la relación de rigidez es consistente, las curvas son estables, y no se aprecia concentraciones de fuerzas en ningún entrepiso.

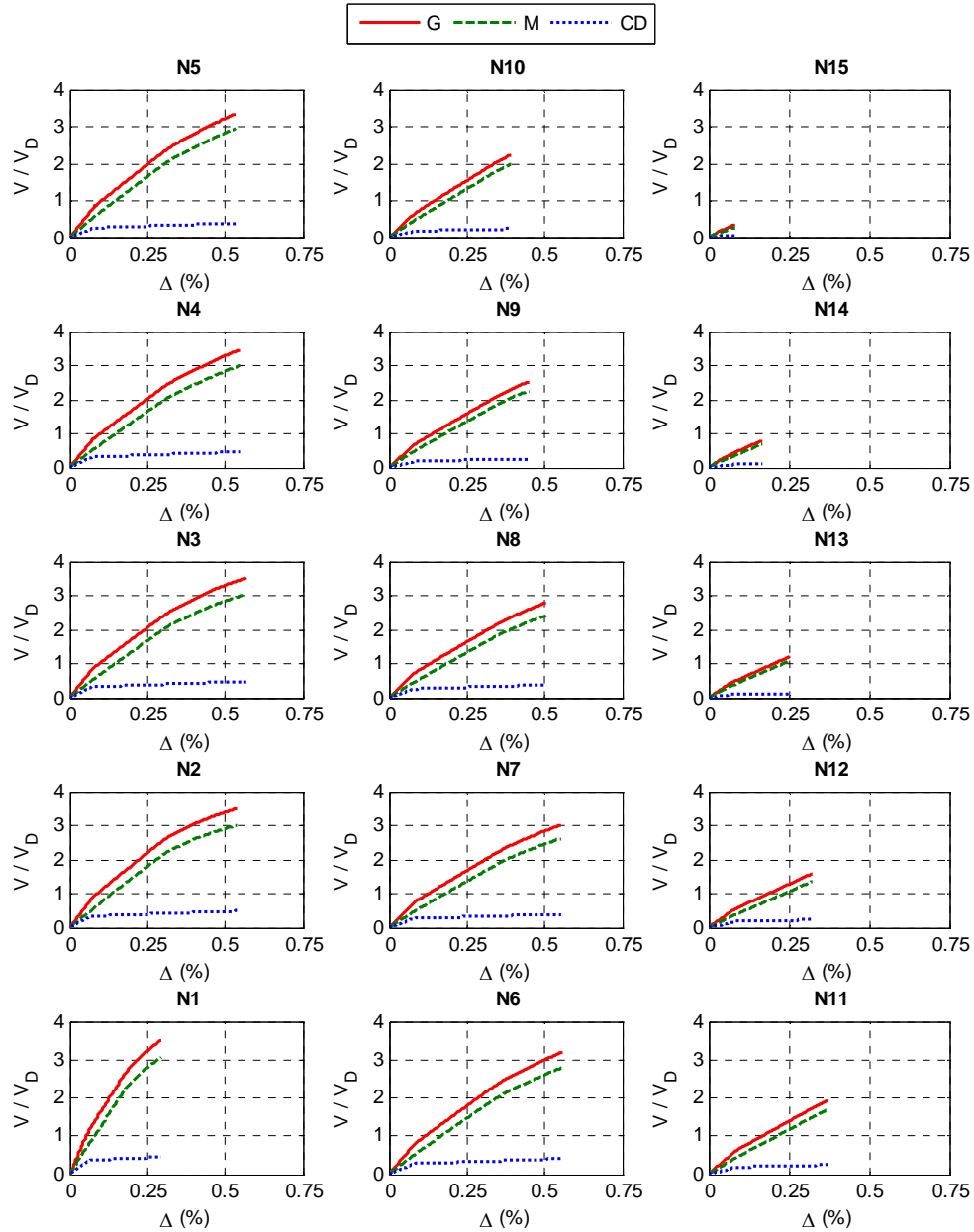


Figura 4.42 Curvas de capacidad por entrepisos modelos
 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

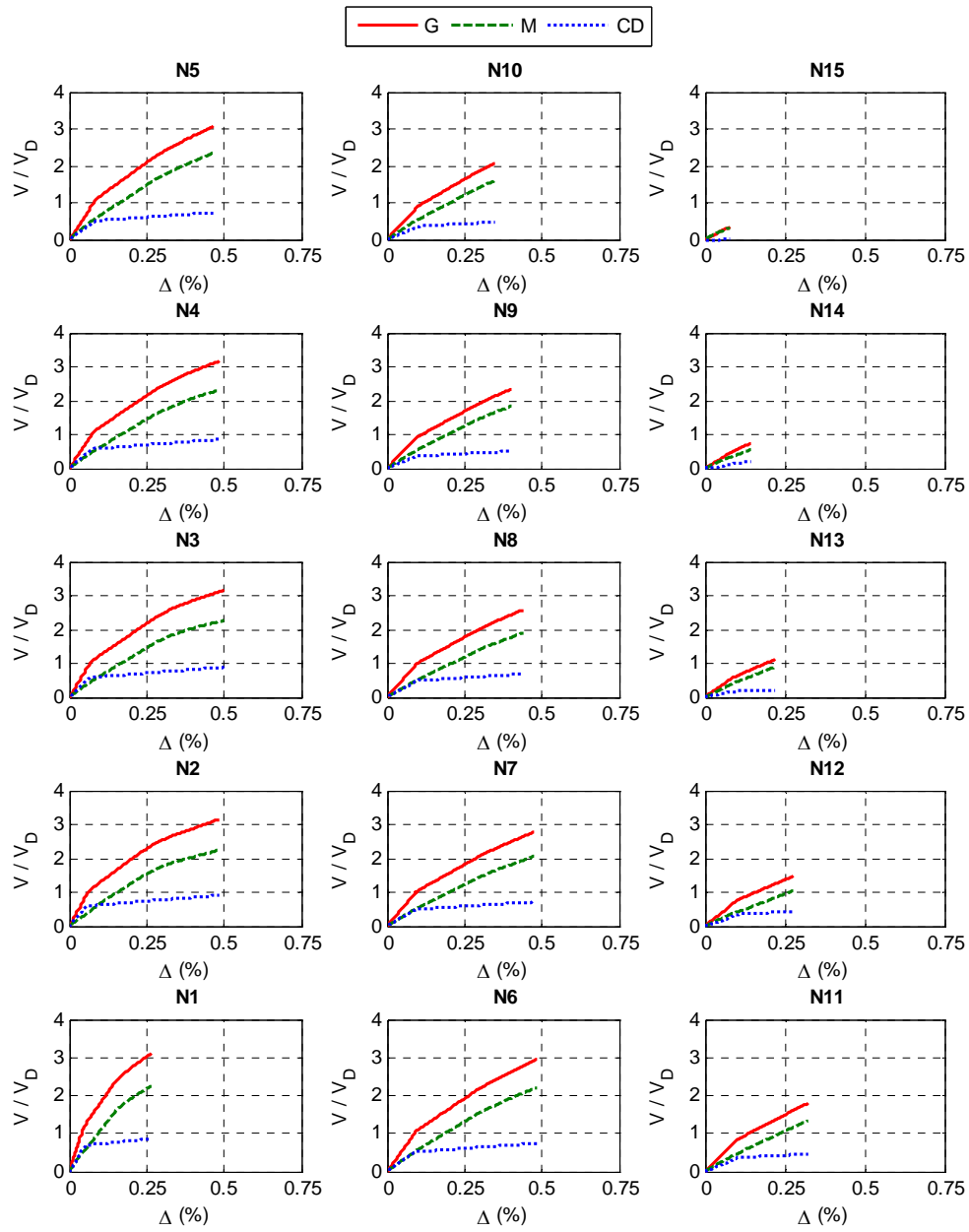


Figura 4.43 Curvas de capacidad por entresijos modelos
 $N = 15, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

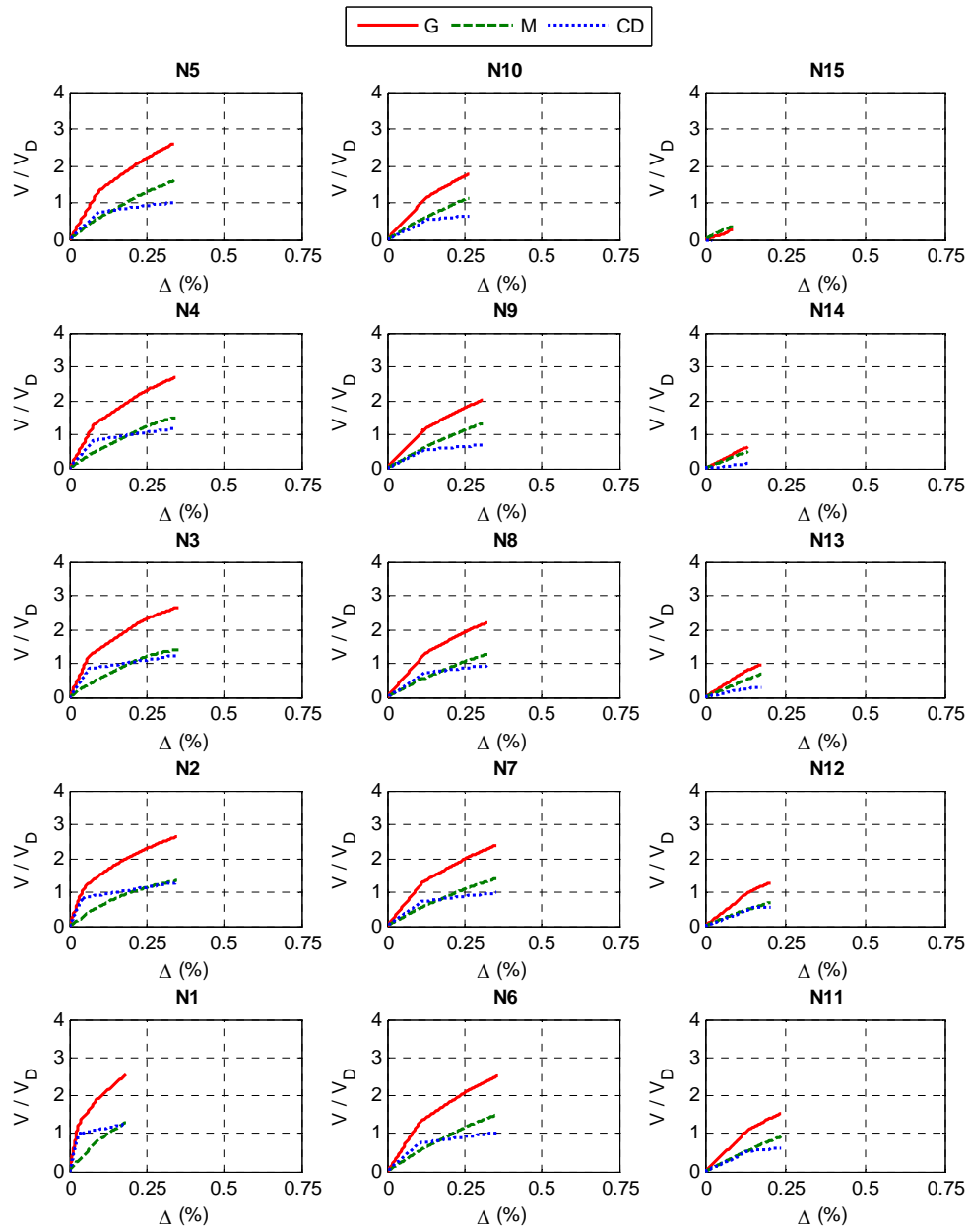


Figura 4.44 Curvas de capacidad por entresijos modelos
 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

En cuanto a las distorsiones del sistema total que ocasionan que los dispositivos histeréticos comiencen a disipar energía y la distorsión en la cual alcanzan su ductilidad objetivo (figura 4.45), se observa que para los casos I y II, las distorsiones de fluencia y finales son aproximadamente iguales; para el caso III las distorsiones de fluencia son menores.

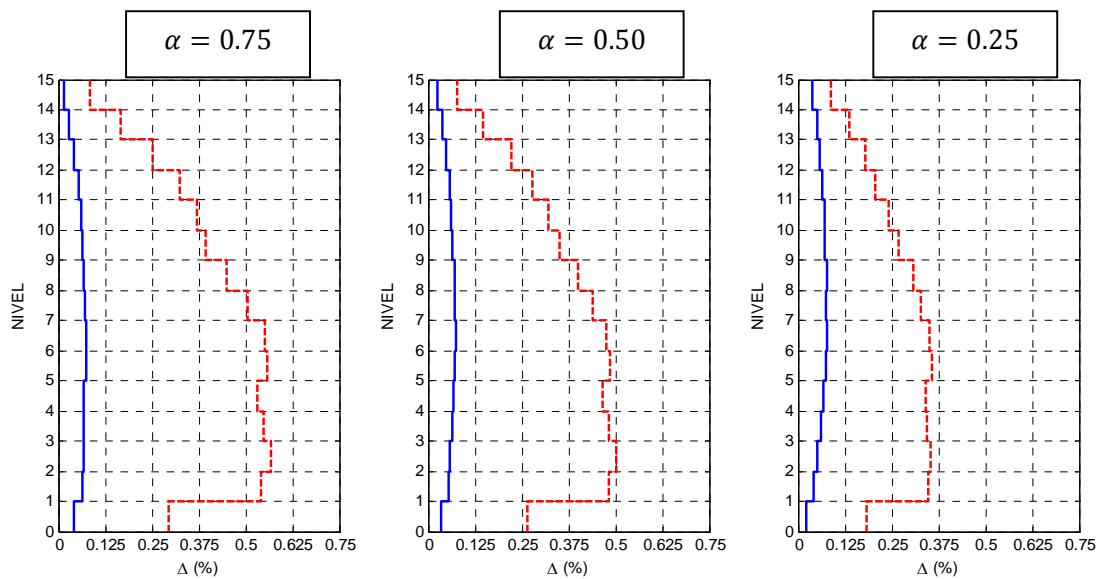


Figura 4.45. Envolventes de distorsiones de entrepisos. $N = 15$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

La relación de rigidez $\alpha = 0.25$ es inviable en términos constructivos y los modelos tienen un desempeño malo con formación de mecanismos indeseados. En cuanto a la relación $\alpha = 0.75$, cumple con la filosofía de diseño por capacidad y su desempeño es bueno; sin embargo, el incremento en el desempeño con respecto al sistema gravitacional es bajo, de manera tal que no se justifica la implantación del sistema disipador. Se concluye entonces que la relación más adecuada para los modelos de quince niveles es cuando el sistema disipador aporta la mitad de la rigidez lateral total ($\alpha = 0.50$). Los límites de diseño deberían ajustarse para garantizar que las columnas no entren en estado no lineal, o ajustar los diseños de las columnas para un mejor desempeño.

4.6.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador

El impacto del parámetro β se reduce seriamente en los modelos de quince niveles. El parámetro β afecta en mayor medida a la relación $\alpha = 0.75$, disminuye para la relación $\alpha = 0.5$, y la influencia para la relación $\alpha = 0.25$ es mínima. Este comportamiento se debe presumiblemente a dos factores: la formación de articulaciones plásticas en las columnas y la deformación a flexión en altura de la estructura. Los corolarios presentados para los modelos de cinco y diez niveles en cuanto al efecto de las distintas relaciones de rigidez entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo (β) son válidos para los modelos de quince niveles.

4.6.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador

Con base en el estudio de las curvas de capacidad, mapeos de articulaciones plásticas y envolventes de distorsión obtenidos de los modelos de 15 niveles, se establecen los mismos

criterios respecto a las relaciones de resistencia que los señalados para los modelos de cinco y diez niveles. Con excepción de las columnas externas, estos elementos para su diseño se deben considerar otros materiales ya que las columnas de concreto reforzado no son eficientes para controlar flexotensiones.

4.6.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d

En términos generales los dispositivos histeréticos fueron demandados en mayor medida del segundo entrepiso al octavo entrepiso, la demanda de ductilidad disminuye para los dos últimos entrepisos. Esto es un reflejo de las distorsiones de entrepiso, lo que claramente demuestra que están interrelacionados. Debido a la consistencia observada en las envolventes de distorsión, las ductilidades recomendadas están en el intervalo de 8 a 10.

4.6.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio

Se puede establecer como límite para el estado límite de servicio una distorsión de azotea del 0.1%, para los casos I y II. Es importante recordar que estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados; sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.6.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de seguridad de operación aquéllos que no le provoquen daño a las columnas

- Caso I distorsiones menores al 0.23%
- Caso II distorsiones menores al 0.17%
- Caso III no se hacen recomendaciones

4.7. Modelos de 20 niveles

La altura de los modelos de veinte niveles encadena una acumulación muy grande de fuerzas a tensión y a compresión en las columnas externas del sistema gravitacional, producto de la interacción con el sistema disipador. Esto, aunado a la rotación del sistema gravitacional, conlleva a proponer columnas con resistencias muy grandes a flexión y, por consiguiente robustas, que no cumplen con varios requisitos para marcos dúctiles que establecen las NTCC 2004, en particular los relacionados con los límites para la fuerza cortante de diseño (sección 2.5.2.4 de las NTCC-2004) y tamaño máximo de barras de acero en conexiones (sección 7.4.5.2). Adicionalmente, un número considerable de relaciones no son factibles desde el punto de vista constructivo.

Los modelos de veinte niveles se diseñaron con un sistema gravitacional único, variando para cada relación el sistema disipador. La ductilidad objetivo de los dispositivos histeréticos de todos los modelos de veinte niveles es de 10 ($\mu_d = 10$). A continuación se presentan los detalles de cada caso.

CASO I ($\alpha = 0.75$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total

El conjunto de modelos del caso I son factibles constructivamente (tabla 4.29), los perfiles son de tamaños comerciales y su peso no representa un problema para su implantación. El sistema gravitacional es relativamente esbelto si lo comparamos con la altura total de la estructura que es de 80m.

20 Niveles $\alpha = 0.75$ <i>Peso = 26,019 t</i>									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
				col.	c1xc2	Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
						barras totales			
1.00	OR 508x15.8	312.98	CV1	V1	100x60	16 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 457x12.7	225.70	CV2			8 #8 + 8 #10			
	OR 356x12.7	170.32	CV3	C1	150x150	76 de #12	150	#6 en 8 ramas @5	#6 en 8 ramas @5
	OR 356x9.5	129.68	CV4						
	OR 305x7.9	92.9	CV5						
0.75	OR 559x19.1	412.48	CV1	V2	95x55	14 #10	190	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 457x15.8	280.54	CV2			7 #8 + 7 #10			
	OR 457x12.7	225.70	CV3	C2	140x140	68 de #12	140	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	OR 356x12.7	170.32	CV4						
	OR 356x9.5	129.68	CV5						
0.50	OR 660x25.4	644.75	CV1	V3	90x50	12 #10	180	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 601x19.1	444.57	CV2			6 #8 + 6 #10			
	OR 559x15.8	345.41	CV3	C3	130x130	60 de #12	130	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	OR 508x12.7	251.61	CV4						
	OR 406x12.7	196.13	CV5						
0.25	OR 762x25.4 OR 601x19.1	1192.96	CV1	V4	85x45	10 #10	170	#4 en 3 ramas @10	#4 en 3 ramas @15
	OR 711x19.1 OR 508x15.8	841.59	CV2			5 #8 + 5 #10			
	OR 660x25.4	644.75	CV3	C4	120x120	52 de #12	120	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	OR 508x25.4	490.32	CV4						
	OR 508x19.1	373.52	CV5						

Tabla 4.29. Resumen de diseño, $N = 20$, $\alpha = 0.75$

En la tabla 4.30 se observa la enorme capacidad a flexión con la que fueron diseñadas las columnas, como consecuencia de suministrar resistencias a fuerza cortante que exceden los límites impuestos por las NTCC 2004. Los giros plásticos máximos calculados con el programa CSISD para las columnas exceden las recomendaciones hechas por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA, por sus siglas en inglés) en su documento FEMA-356 (FEMA 356).

β	20 niveles			$\alpha = 0.75$		$V_D = 743.5\ t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	92.9	519.5	367.4	453.92	487.69	0.0585	0.0659	2802.74	0.0836
	87.7	372.4	263.3						
	74.8	273.5	193.4						
	55.1	208.6	147.5						
	29.1	149.4	105.7						
0.75	92.9	687.9	486.4	377.94	403.72	0.0582	0.0655	2317.53	0.0814
	87.7	462.6	327.1						
	74.8	372.4	263.3						
	55.1	170.3	193.4						
	29.1	128.7	147.3						
0.50	92.9	1081.0	764.4	307.59	237.53	0.0574	0.0646	1878.57	0.0795
	87.7	743.4	525.7						
	74.8	576.1	407.4						
	55.1	417.9	295.5						
	29.1	325.8	230.3						
0.25	92.9	2006.6	1418.9	242.81	258.94	0.0566	0.0715	1515.20	0.0677
	87.7	1413.6	999.6						
	74.8	1081.0	764.4						
	55.1	813.3	575.1						
	29.1	619.5	438.1						

Tabla 4.30. Resistencias de los sistemas, $N = 20, \alpha = 0.75$

La figura 4.46 representa una curva de capacidad típica de los modelos del caso I, donde se observa que el margen de fluencia de los elementos viga y columna es estrecho. Para fines prácticos, se debe de considerar una fluencia simultánea. Las distorsiones que provocan el daño del sistema gravitacional son las mayores de los tres casos; estas distorsiones se encuentran alrededor del 0.21%, lo que redunda en un desplazamiento de azotea de aproximadamente 17 cm.

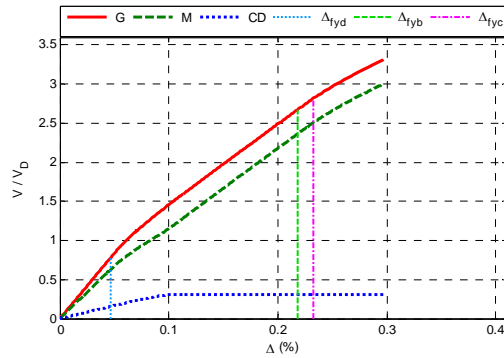


Figura 4.46. Curva de capacidad global, $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Del análisis de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, como el que se reporta en la figura 4.47, se observa que los modelos correspondientes al caso I tienen el mayor número de articulaciones plásticas de las tres relaciones α . La única columna con daño es la columna externa que se encuentra flexotensionada. El parámetro β no tiene un efecto en la formación de articulaciones plásticas, es decir, los mapeos equiparables (conjuntos con pendiente post-fluencia igual) son prácticamente iguales. Las ductilidades desarrolladas por los dispositivos histeréticos están en el intervalo de seis a diez para la mayoría de los entrepisos.

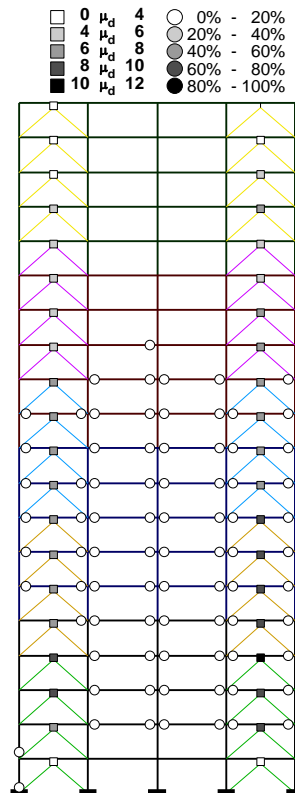


Figura 4.47. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO II ($\alpha = 0.5$) Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total

En los modelos con la relación $\beta = 0.50$ y $\beta = 0.25$ reportados en la tabla 4.31, no se especifican secciones de las diagonales de contraventeo, por considerarse que son inviables constructivamente, indicando únicamente las áreas de acero necesarias.

20 Niveles $\alpha = 0.50$ $Peso = 26,019 t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	$h \times b$	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
				col.	c1xc2	Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
						barras totales			
1.00	OR 762x19.1 OR 601x19.1	980.06	CV1	V1	100x60	16 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 711x25.4	696.57	CV2			8 #8 + 8 #10			
	OR 711x19.1	528.61	CV3	C1	150x150	76 de #12	150	#6 en 8 ramas @5	#6 en 8 ramas @5
	OR 356x9.5	412.48	CV4						
	OR 305x7.9	312.98	CV5						
0.75	OR 762x25.4 OR 711x19.1	1277.01	CV1	V2	95x55	14 #10	190	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	OR 762x19.1 OR 559x15.8	912.99	CV2			7 #8 + 7 #10			
	OR 711x25.4	696.57	CV3	C2	140x140	68 de #12	140	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	OR 559x25.4	542.14	CV4						
	OR 559x19.1	412.48	CV5						
0.50	-	1835.5	CV1	V3	90x50	12 #10	180	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	-	1277.00	CV2			6 #8 + 6 #10			
	-	1002	CV3	C3	130x130	60 de #12	130	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	-	773.1	CV4						
	-	584.9	CV5						
0.25	-	3583.5	CV1	V4	85x45	10 #10	170	#4 en 3 ramas @10	#4 en 3 ramas @15
	-	2493.10	CV2			5 #8 + 5 #10			
	-	1956.3	CV3	C4	120x120	52 de #12	120	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	-	1509.3	CV4						
	-	1141.9	CV5						

Tabla 4.31. Resumen de diseño, $N = 20$, $\alpha = 0.5$

Las resistencias de los modelos $\alpha = 0.5$ se reportan en la tabla 4.32. Lo que varía es el sistema disipador, por tanto, las mismas observaciones hechas en el caso I son válidas para este conjunto.

β	20 niveles $\alpha = 0.50$ $V_D = 867.4 t$								
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	216.8	1648.7	1165.8	453.92	487.69	0.0585	0.0659	2802.74	0.0836
	204.7	1170.0	827.3						
	174.6	888.0	628.0						
	128.5	687.9	486.4						
	98.0	521.9	369.1						
0.75	216.8	2148.0	1518.8	377.94	403.72	0.0582	0.0655	2317.53	0.0814
	204.7	1535.9	1086.0						
	174.6	1170.0	827.3						
	128.5	903.6	639.0						
	98.0	687.5	486.2						
0.50	216.8	3087.1	2182.9	307.59	237.53	0.0574	0.0646	1878.57	0.0795
	204.7	2147.8	1518.7						
	174.6	1685.3	1191.7						
	128.5	1300.3	919.4						
	98.0	983.7	695.6						
0.25	216.8	6027.3	4261.9	242.81	258.94	0.0566	0.0715	1515.20	0.0677
	204.7	4193.3	2965.1						
	174.6	3290.3	2326.6						
	128.5	2538.6	1795.1						
	98.0	1920.6	1358.1						

Tabla4.32. Resistencias de los sistemas, $N = 20, \alpha = 0.5$

A continuación se muestra una curva de capacidad típica (figura 4.50) para los modelos del caso II, donde se observa que la relación de rigidez α no se cumple de manera exacta, a diferencia de los modelos de cinco, diez y quince niveles, donde se puede apreciar que las curvas del sistema gravitacional y del sistema disipador se superponen. El sistema gravitacional fluye a una distorsión menor que para el caso I. La columna externa a flexotensión fluye a distorsiones menores que el caso I. Los modelos incumplen el diseño por capacidad, al dañarse primero las columnas.

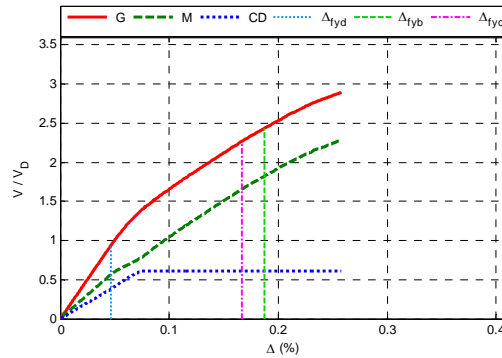


Figura 4.48. Curva de capacidad global, $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Con base en el estudio de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas como la mostrada en la figura 4.49 correspondiente a los modelos $\alpha = 0.5$, se observa que la última sección del sistema gravitacional no sufre daño. Los mapeos de articulaciones plásticas para los modelos equiparables (iguales parámetros α y K_2), son prácticamente iguales. No hay una diferencia significativa en los mapeos conforme el parámetro β disminuye. Para la mayoría de los entrepisos, las ductilidades desarrolladas por los dispositivos histeréticos están en el intervalo de cuatro a diez.

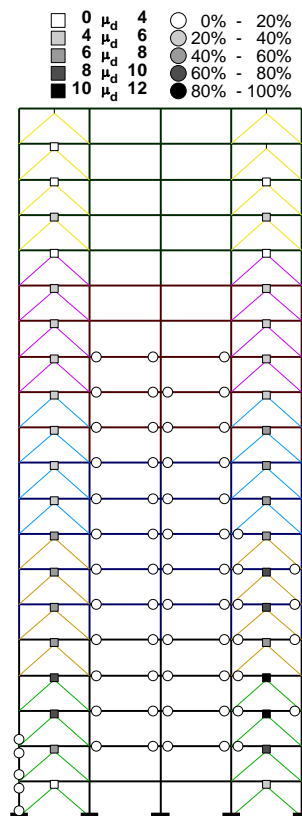


Figura 4.49. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO III ($\alpha = 0.25$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total

La relación de rigidez $\alpha=0.25$ no es factible en términos constructivos con la configuración del sistema disipador que se utiliza en este estudio. En la tabla 4.33 se reportan las áreas de acero requeridas.

20 Niveles $\alpha = 0.25$ <i>Peso = 26,019 t</i>									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm ²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
				col.	c1xc2	barras totales			
1.00	-	2884.3	CV1	V1	100x60	16 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	-	2006.70	CV2			8 #8 + 8 #10			
	-	1574.6	CV3	C1	150x150	76 de #12	150	#6 en 8 ramas @5	#6 en 8 ramas @5
	-	1214.8	CV4						
	-	919.1	CV5						
0.75	-	3758.3	CV1	V2	95x55	14 #10	190	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	-	2614.80	CV2			7 #8 + 7 #10			
	-	2051.70	CV3	C2	140x140	68 de #12	140	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	-	1583	CV4						
	-	1197.6	CV5						
0.50	-	5506.4	CV1	V3	90x50	12 #10	180	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	-	3830.90	CV2			6 #8 + 6 #10			
	-	3006	CV3	C3	130x130	60 de #12	130	#5 en 8 ramas @5	#5 en 8 ramas @5
	-	2319.2	CV4						
	-	1754.6	CV5						
0.25	-	10750.6	CV1	V4	85x45	10 #10	170	#4 en 3 ramas @10	#4 en 3 ramas @15
	-	7479.50	CV2			5 #8 + 5 #10			
	-	5868.8	CV3	C4	120x120	52 de #12	120	#5 en 6 ramas @5	#5 en 6 ramas @5
	-	4528	CV4						
	-	3425.7	CV5						

Tabla 4.33. Resumen de diseño, $N = 20$, $\alpha = 0.25$

En la tabla 4.34 se reportan las resistencias de los modelos del caso III. Las observaciones hechas en el caso I y II son válidas para este conjunto.

β	20 niveles $\alpha = 0.25$ $V_D = 1040.8 t$								
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n(t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	390.3	4851.2	3430.3	453.92	487.69	0.0585	0.0659	2802.74	0.0836
	368.4	3375.1	2386.6						
	314.3	2648.3	1872.6						
	231.3	2043.3	1444.8						
	122.3	1545.9	1093.1						
0.75	390.3	6321.3	4469.8	377.94	403.72	0.0582	0.0655	2317.53	0.0814
	368.4	4397.9	3109.8						
	314.3	3450.8	2440.1						
	231.3	2662.5	1882.6						
	122.3	2014.3	1424.3						
0.50	390.3	9261.4	6548.8	307.59	237.53	0.0574	0.0646	1878.57	0.0795
	368.4	6443.4	4556.2						
	314.3	5055.9	3575.1						
	231.3	3900.8	2758.3						
	122.3	2951.2	2086.8						
0.25	390.3	18081.8	12785.8	242.81	258.94	0.0566	0.0715	1515.20	0.0677
	368.4	12580.0	8895.4						
	314.3	9871.0	6979.9						
	231.3	7615.9	5385.2						
	122.3	5761.8	4074.2						

Tabla4.34. Resistencias de los sistemas, $N = 15, \alpha = 0.75$

La curva de capacidad típica para los modelos $\alpha = 0.25$ se presenta en la figura 4.50. El comportamiento de las curvas de capacidad de los modelos del caso III no es satisfactorio por las razones siguientes: a) las distorsiones finales son las más bajas de los tres casos, b) los principios del diseño por capacidad no se cumplen y, c) el sistema gravitacional se daña a distorsiones menores que los casos I y II.

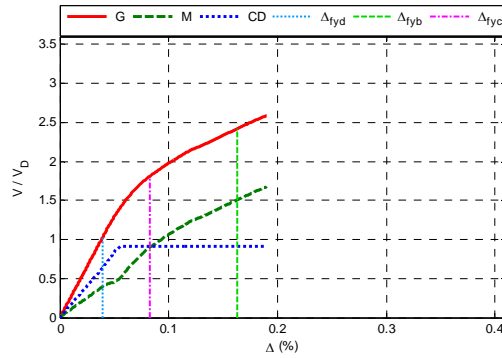


Figura 4.50. Curva de capacidad global, $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.51 se ilustra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.25$. Los modelos del caso III mostraron la menor formación de articulaciones plásticas en el sistema gravitacional. Los dispositivos histeréticos con mayor demanda se localizan en el segundo nivel, de los niveles tres al once las ductilidades son de entre cuatro y ocho, del nivel once al dieciocho las ductilidades están en el intervalo de cero a cuatro, mientras que los disipadores de los últimos dos niveles permanecen elásticos. La columna externa a flexotensión muestra un daño que se extiende del nivel uno al seis, formando patrones de daño desfavorables para el desempeño de la estructura, puesto que se forman articulaciones en ambos extremos de las columnas en el nivel uno, lo que tiene como consecuencia la pérdida de estabilidad (Paulay 1996).

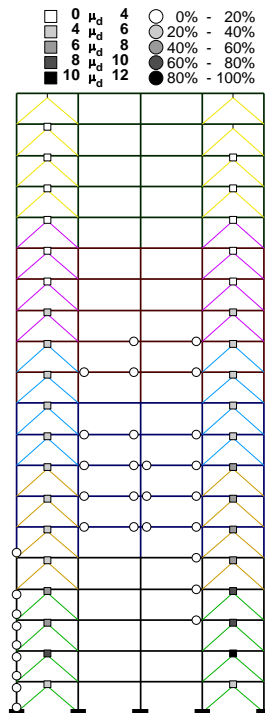


Figura 4.51. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

4.7.1. Observaciones generales de los modelos de 20 niveles

Los modelos que presentan mayor ductilidad y sobrerresistencia de cada caso de estudio se reportan en las figuras de esta sección. Los modelos correspondientes son: $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$; $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$ y $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$. Los resultados completos se incluyen en el Apéndice A.

4.7.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales

Los resultados presentados en las tablas 4.35, 4.36 y 4.37 siguen un patrón donde los valores de ductilidad (Q) y sobrerresistencia (R) se incrementan en la medida que aumenta la relación de rigidez β y la pendiente post-fluencia K_2 , debido los mismos factores mencionados para los modelos de cinco, diez y quince niveles.

20 Niveles $\alpha = 0.75$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	4.29	6.42	4.41	6.50	4.48	6.54	0.9742
0.75	4.48	6.85	4.61	6.93	4.67	6.96	0.9694
0.50	4.66	7.27	4.79	7.34	4.87	7.38	0.9583
0.25	4.86	7.88	4.99	7.92	5.05	7.93	0.9540

Tabla 4.35. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 15, \alpha = 0.75$

20 Niveles $\alpha = 0.5$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.10	3.20	3.20	5.62	3.27	5.67	0.8811
0.75	3.19	3.29	3.29	5.92	3.36	5.96	0.8762
0.50	3.29	3.39	3.39	6.27	3.45	6.30	0.8731
0.25	3.40	3.49	3.49	6.60	3.55	6.64	0.8673

Tabla 4.36. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 20, \alpha = 0.5$

20 Niveles $\alpha = 0.25$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	2.49	4.79	2.61	2.67	2.67	4.86	0.7835
0.75	2.54	4.97	2.66	2.72	2.72	5.02	0.7809
0.50	2.60	5.21	2.70	2.76	2.76	5.23	0.7779
0.25	2.66	5.44	2.76	2.81	2.81	5.43	0.7747

Tabla 4.37. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 20, \alpha = 0.25$

Los modelos de veinte niveles son poco susceptibles al parámetro β . La poca variación que se presenta en los valores de ductilidad y sobrerresistencia es debido a que los dispositivos histeréticos son menos rígidos conforme aumenta la relación β , lo que redundaría en una distorsión menor para provocar su fluencia. El comportamiento de las curvas de capacidad y los mapeos de articulaciones plásticas no varían de una forma apreciable. El parámetro β afecta en mayor medida a la relación $\alpha = 0.75$, disminuye para la relación $\alpha = 0.5$, y la influencia para la relación $\alpha = 0.25$ es mínima.

4.7.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador

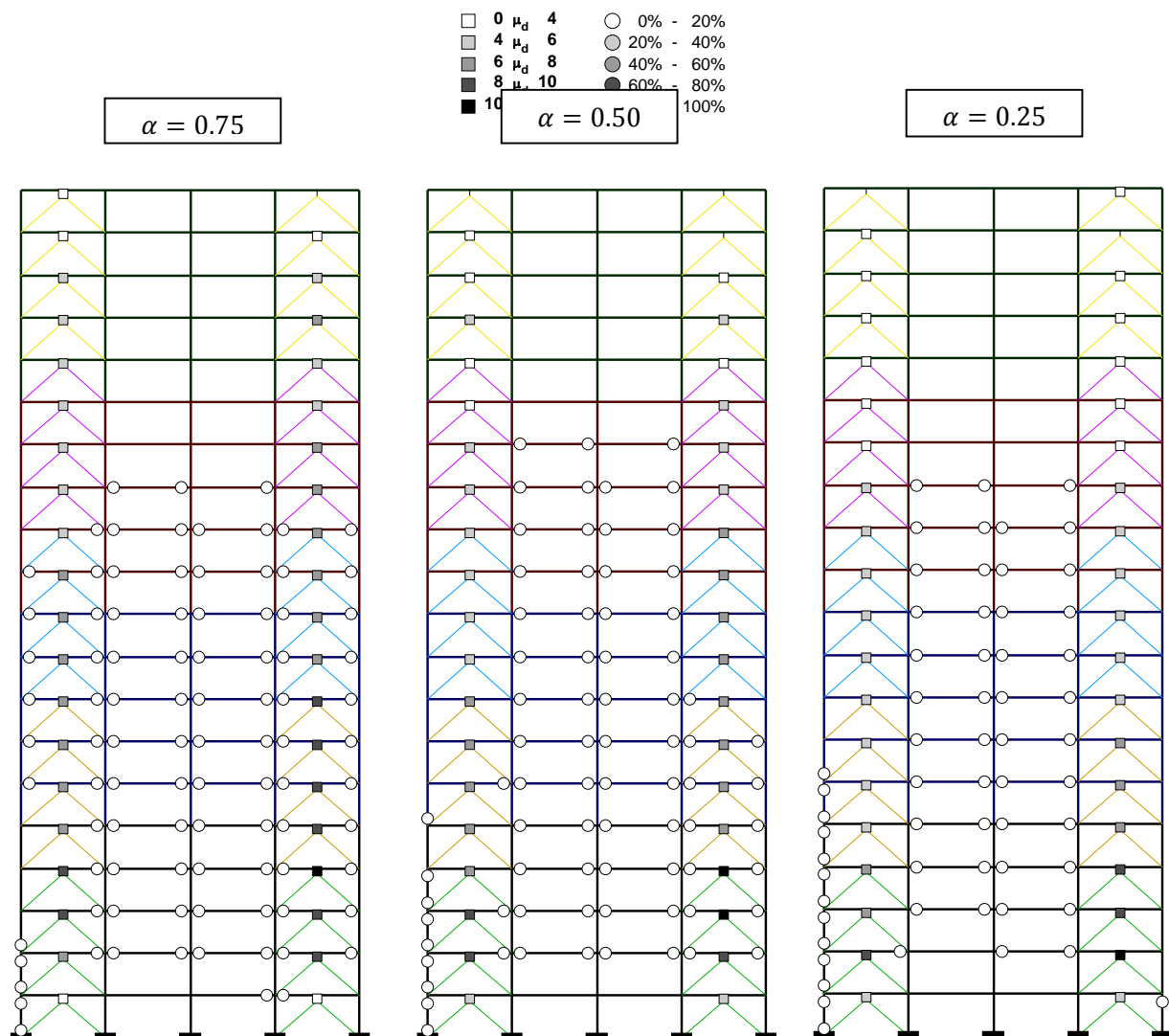


Figura 4.52. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas,

$$N = 20, \beta = 0.25 \text{ y } K_2 = 5\%$$

Del análisis de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de todos los casos de estudio, como los que se presentan en la figura 4.52, se establece:

- Los modelos con mayor daño en el sistema gravitacional corresponden al caso I.
- Los modelos con un daño intermedio en el sistema gravitacional corresponden al caso II.
- Los modelos con el menor daño al sistema gravitacional corresponden al caso III

Del análisis conjunto de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas (figura 4.52), curvas de capacidad global (figura 4.53) y envolventes de distorsión por entrepiso (figuras 4.54, 4.55 y 4.56), se establece lo siguiente:

- Para el caso I: no hay un incremento significativo en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional. Las vigas y columnas fluyen casi simultáneamente y en consecuencia las distorsiones máximas para el estado límite de diseño operacional tendrían que reducirse hasta el inicio de formación de articulaciones plásticas en las columnas para evitar mecanismos indeseables.
- Para el caso II: hay un incremento en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional. Las distorsiones de fluencia de vigas y columnas se ven disminuidas notablemente. Las distorsiones máximas para el estado límite de diseño operacional tendrían que reducirse hasta el inicio de formación de articulaciones plásticas en las columnas, para evitar mecanismos indeseables.
- Para el caso III: hay un incremento importante en el desempeño del sistema total con respecto al sistema gravitacional, Sin embargo, el comportamiento de los modelos es totalmente indeseable por las siguientes razones: a) las distorsiones finales son bajas, b) los principios del diseño por capacidad no se cumplen, c) el sistema gravitacional se daña a distorsiones mucho menores que los casos I y II, d) la columna externa a flexotensión se daña a distorsiones muy bajas y, e) las columnas externas se dañan de manera indeseable, formando mecanismos de articulaciones plásticas dobles y formación de articulaciones plásticas en flexocompresión.

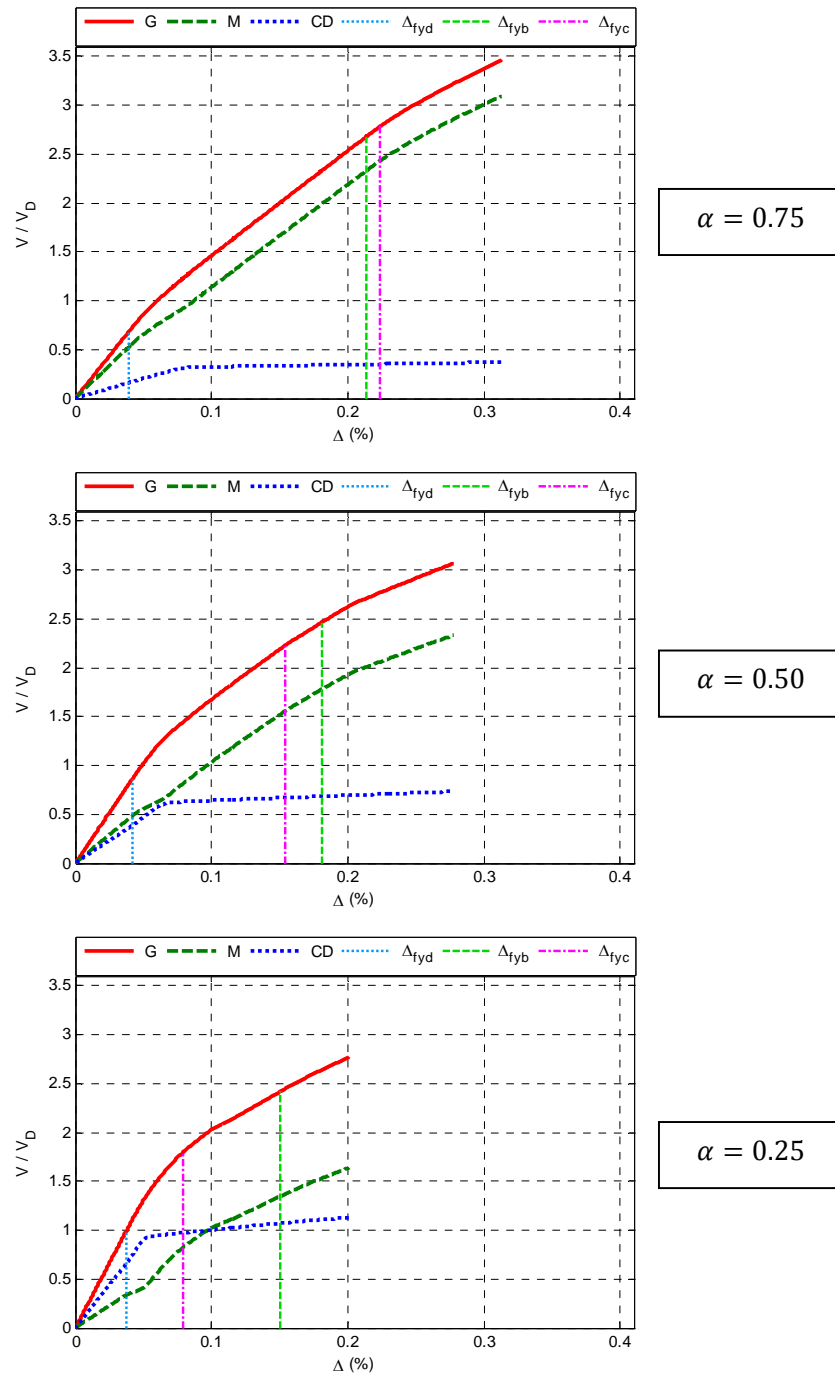


Figura 4.53 Curva de capacidad modelos. $N = 20$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Los cortantes de diseño con respecto a los cuales están normalizadas las curvas de capacidad son:

- Caso I ($\beta = 0.75$) $V_D = 743.5 t$
- Caso II ($\beta = 0.5$) $V_D = 867.4 t$
- Caso III ($\beta = 0.25$) $V_D = 1040.8 t$

En las figuras 4.56, 4.57 y 4.58 se presentan las curvas de capacidad por entrepisos para los modelos que se vienen mostrando. Se observa que en todos los entrepisos la relación de rigidez es consistente, las curvas son estables, y no se aprecian concentraciones de fuerzas en ningún entrepiso.

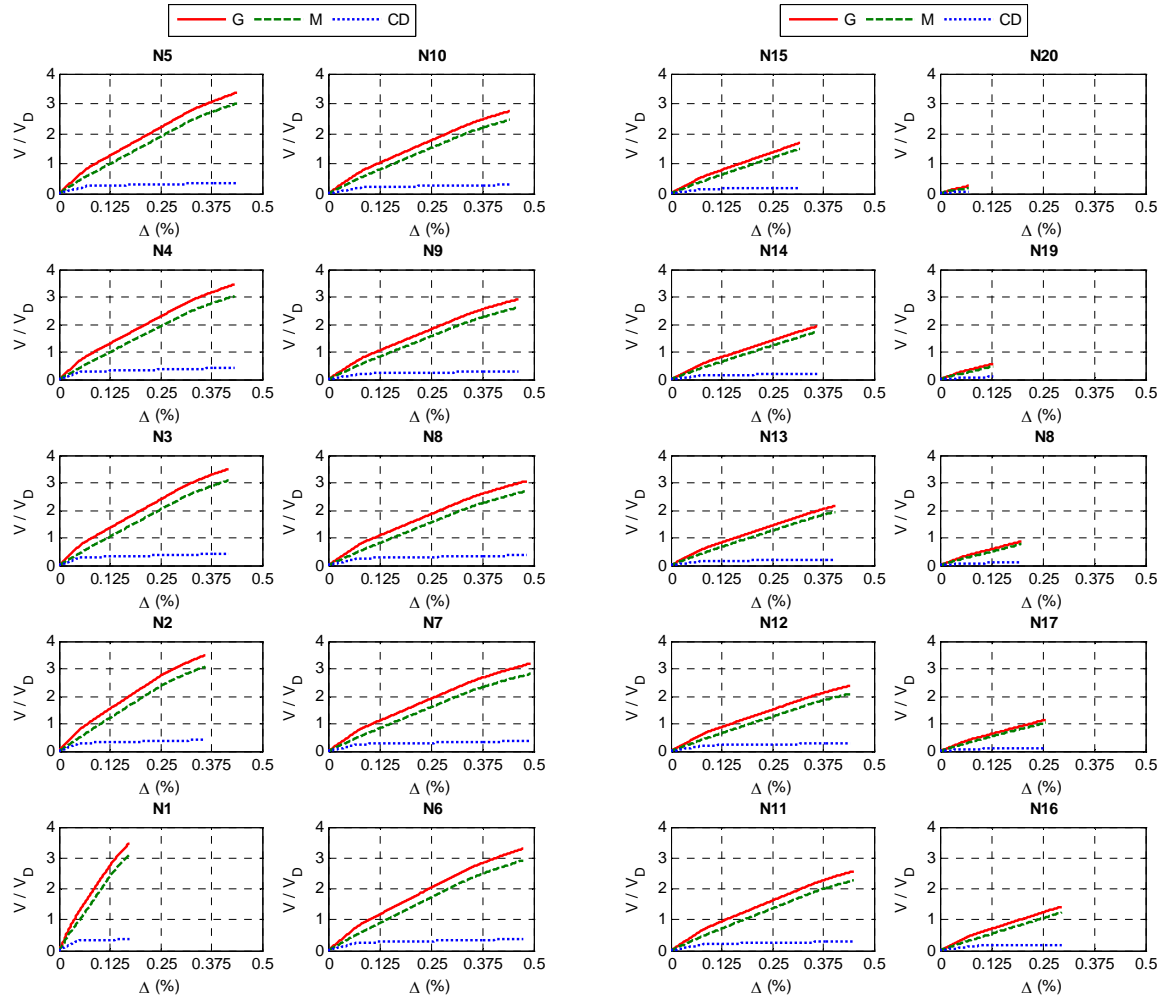


Figura 4.54 Curvas de capacidad por entrepisos modelos
 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

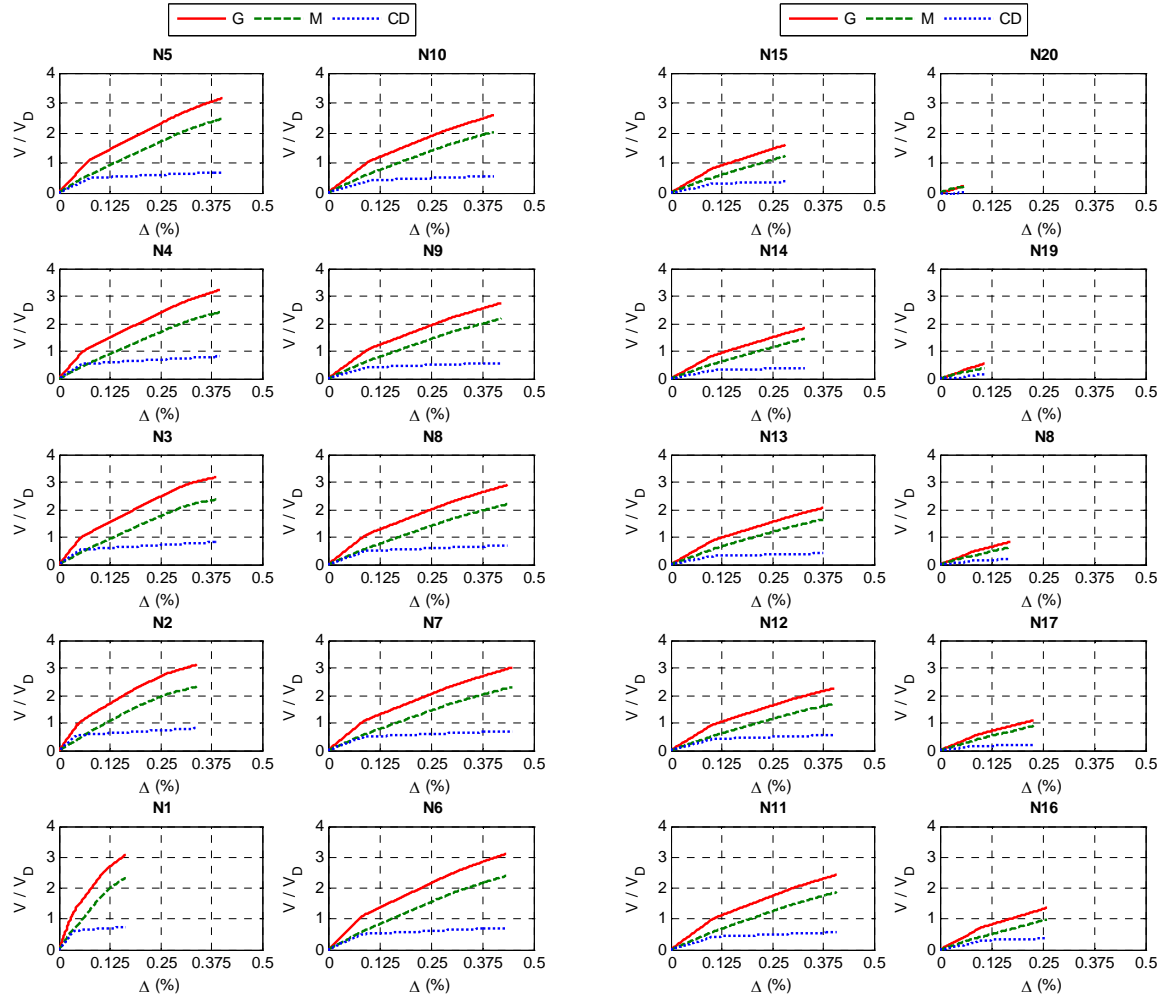


Figura 4.55 Curvas de capacidad por entrepisos modelos
 $N = 20, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

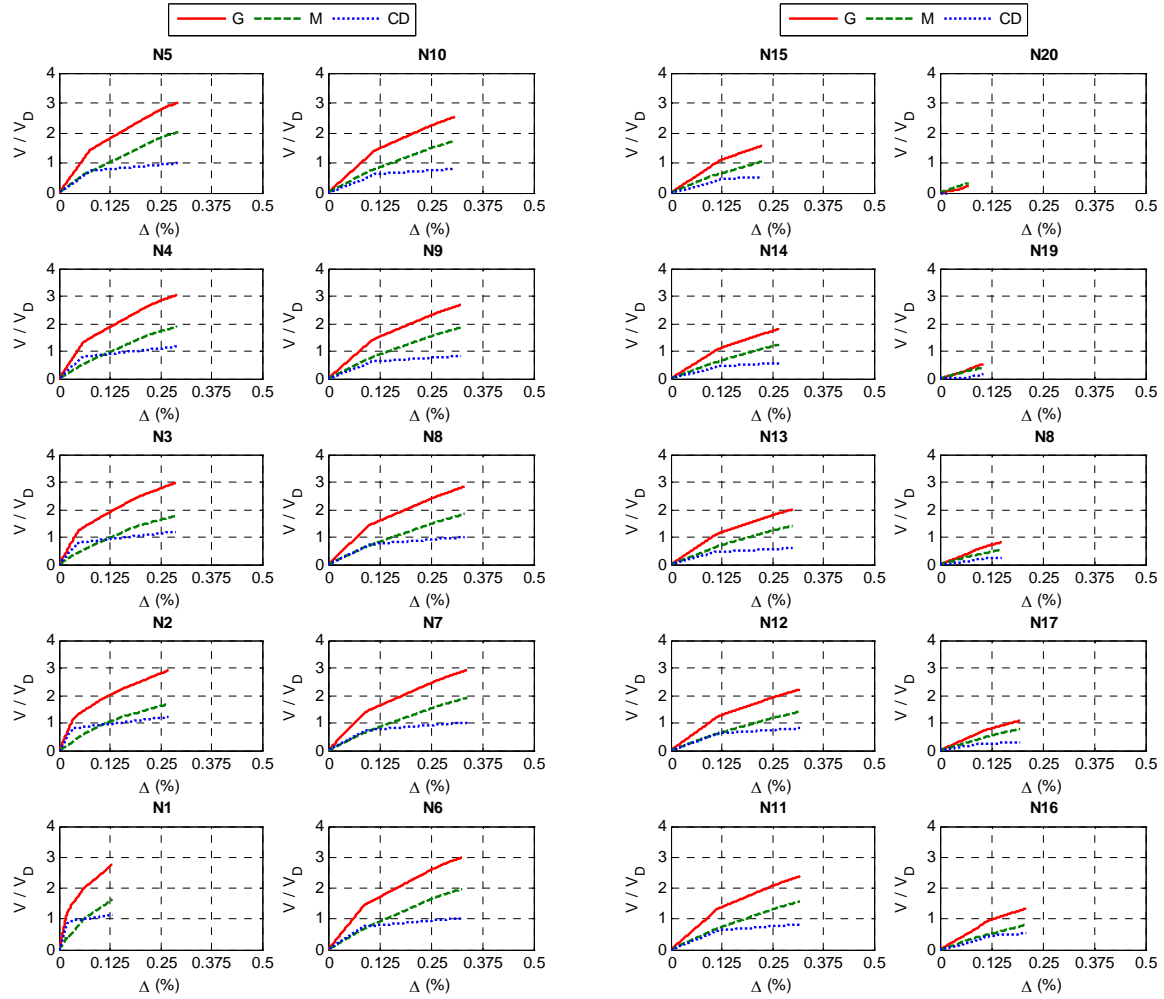


Figura 4.56 Curvas de capacidad por entrepisos modelos
 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Las gráficas de envolventes de distorsiones, como las presentadas en la figura 4.57, indican que los modelos del caso I alcanzan las distorsiones más grandes de los tres casos; en contraparte, los modelos del caso III son los que se distorsionan menos.

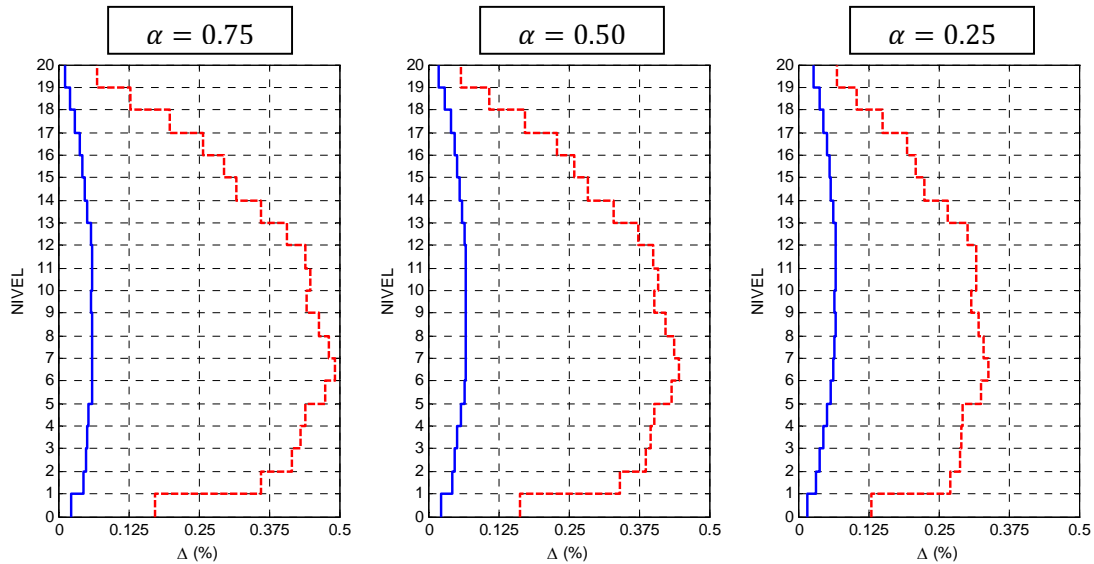


Figura 4.57. Envolventes de distorsiones de entrepisos. $N = 20$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

La relación de rigidez $\alpha = 0.25$ es inviable en términos constructivos, y los modelos tienen un desempeño malo con formación de mecanismos indeseados. En cuanto a la relación $\alpha = 0.75$, el desempeño es apenas satisfactorio, y no justifica la implantación del sistema disipador. La relación con mejor desempeño es $\alpha = 0.50$, la disipación de energía es significativa. Las distorsiones últimas deberían ajustarse para garantizar que las columnas no entren en estado no lineal, o ajustar los diseños de las columnas para un mejor desempeño.

4.7.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador

Los corolarios presentados para los modelos de cinco, diez y quince niveles, en cuanto al efecto de las distintas relaciones de rigidez entre el dispositivo histerético y el sistema de contraventeo (β), son también válidos para los modelos de veinte niveles. Sin embargo, el efecto del parámetro β es mínimo en los modelos de veinte niveles. El parámetro β afecta en mayor medida a la relación $\alpha = 0.75$, disminuye para la relación $\alpha = 0.5$, y la influencia para la relación $\alpha = 0.25$ es mínima. Este comportamiento se debe principalmente a la deformación en flexión de toda estructura.

4.7.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador

Con base en los resultados observados, se establecen los mismos criterios respecto a las relaciones de resistencia que los señalados para los modelos de cinco, diez y quince niveles. Con excepción de las columnas externas, estos elementos para su diseño se deben considerar otros materiales, ya que las columnas de concreto reforzado no son eficientes para controlar flexotensiones.

4.7.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d

La ductilidad demandada de los dispositivos histeréticos esta interrelacionada con la distorsión de entrepiso, aunque para los modelos de veinte niveles ya no es tan clara esta relación en los niveles superiores de la estructura, debido a la deformación que sufre en flexión a lo largo de la altura del edificio. Los dispositivos histeréticos fueron demandados en mayor medida del segundo al onceavo entrepiso; la demanda de ductilidad disminuye para los últimos entrepisos. Es evidente la relación de la distorsión última de la estructura con la distorsión de cada uno de los entrepisos, y ésta a su vez con la ductilidad demandada a los dispositivos histeréticos. Por lo tanto, es una necesidad dotar a los dispositivos histeréticos de la suficiente capacidad de deformación (ductilidad), para permitir que la estructura desarrolle una mayor distorsión de azotea, sin peligro de que los dispositivos se desconecten. Las ductilidades recomendadas están en el intervalo de 8 a 10.

4.7.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio

Se puede establecer como límite para el estado límite de servicio una distorsión de azotea del 0.1%, para los casos I y II. Es importante recordar que estos límites son los máximos encontrados en los modelos analizados. Sin embargo, éstos se pueden modificar en función de las relaciones de resistencias entre el sistema gravitacional y el sistema disipador.

4.7.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional

Se puede establecer como límites de distorsión para el estado límite de seguridad de operación aquéllos que no le provoquen daño a las columnas.

- Caso I: distorsiones menores al 0.23%
- Caso II: distorsiones menores al 0.18%

4.8. Modelos de 25 niveles

Los modelos de veinticinco niveles tiene una altura de 100m y la esbeltez en altura es importante ($h/b = 3.125$). Es complicado implantar las relaciones α , al grado que resultan totalmente inviables constructivamente las relaciones $\alpha = 0.5$ y $\alpha = 0.25$. Para la relación $\alpha = 0.75$, las únicas relaciones β que son factibles de diseñar y construir son; $\beta = 1.0$ y $\beta = 0.75$. Resulta muy complicado diseñar un sistema gravitacional capaz de resistir las demandas mecánicas, producto de la interacción con el sistema disipador y la rotación propia. Esto conlleva a proponer columnas muy robustas, con resistencias muy grandes a flexión que presentan serias complicaciones para cumplir con los requisitos de marcos dúctiles de las NTCC 2004, en relación con los límites que establece el reglamento para la fuerza cortante de diseño (sección 2.5.2.4 de las NTCC-2004) y tamaño máximo de barras de acero en conexiones (sección 7.4.5.2 NTCC-2004).

Todos los modelos de veinticinco niveles se diseñaron con el mismo sistema gravitacional, de manera tal que el único parámetro que varía es el sistema disipador (diagonales y dispositivos) para cada uno de los modelos. La ductilidad objetivo del dispositivo histerético con la que se diseñó el sistema disipador de todos los modelos de veinte niveles fue de 10 ($\mu_d = 10$). A continuación se presentan los detalles de cada caso.

CASO I ($\alpha = 0.75$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total

Los modelos $\beta = 1.0$ y $\beta = 0.75$ del caso I presentados en la tabla 4.38 son los únicos que se consideran factibles en términos constructivos. El sistema gravitacional, a pesar de tener columnas cuadradas de 200 x 200 cm en la base, es relativamente esbelto, si lo comparamos con la altura total de la estructura, que es de 100 m.

25 Niveles $\alpha = 0.75$ $Peso = 39,330\ t$									
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional					
	designación	área (cm²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal		
				vigas	$h \times b$	Lecho A-	zona plástica		zona elástica
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos
col.	c1xc2	barras totales							
1.00	OR 762x19.1	748.4	CV1	V1	120x75	8 #8 + 12 #10	240	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15
	OR 660x19.1	489.7	CV2			20 #10			
	OR 559x19.1	412.5	CV3	C1	200x200	144 de #12	200	#8 en 10 ramas @5	#8 en 10 ramas @5
	OR 508x15.8	313.0	CV4						
	OR 508x12.7	251.6	CV5						
	OR 406x12.7	196.1	CV6	V2	115x70	7 #8 + 11 #10	230	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15
OR 762x19.1 OR 559x15.8	980.0	CV1	18 #10						
0.75	OR 660x25.4	644.8	CV2	C2	180x180	112 de #12	360	#8 en 8 ramas @5	#8 en 8 ramas @5
	OR 559x25.4	542.1	CV3						
	OR 559x19.1	412.5	CV4						
	OR 508x15.8	313.0	CV5	V3	110x65	6 #8 + 10 #10	220	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15
	OR 508x12.7	251.6	CV6			16 #10			
	0.50	-	1432.0	CV1	C3	160x160	88 de #12	320	#8 en 8 ramas @5
-		932.8	CV2						
-		760.2	CV3						
-		610.6	CV4	V4	105x60	5 #8 + 9 #10	210	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
-		481.3	CV5			14 #10			
-		369.5	CV6						
0.25	-	2796.3	CV1	C4	140x140	64 de #12	280	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5
	-	1821.2	CV2						
	-	1484.3	CV3	V5	100x55	4 #8 + 8 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15
	-	1192.1	CV4			12 #10			
	-	939.7	CV5	C5	120x120	48 de #12	240	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5
	-	721.4	CV6						

Tabla 4.38. Resumen de diseño, $N = 25$, $\alpha = 0.75$

En la tabla 4.39 se indican las resistencias de los distintos sistemas. La enorme capacidad a flexión con la que fueron diseñadas las columnas trae consigo la consecuencia de suministrar, resistencias a fuerza cortante que exceden los límites impuestos por las NTCC 2004 para el diseño y construcción de marcos dúctiles.

β	25 niveles			$\alpha = 0.75$		$V_D = 1126.8 t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	V_n (t)	P_R (t)	V_R (t)	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	140.8	1261.8	892.3	714.26	777.56	0.0456	0.0560	6909.05	0.0675
	135.0	821.8	581.1						
	116.3	669.8	473.6						
	94.0	538.0	380.4						
	66.2	424.0	299.8						
	33.8	325.5	230.2						
0.75	140.8	1644.2	1162.6	620.83	668.62	0.0523	0.0522	4793.60	0.0602
	135.0	1070.8	757.2						
	116.3	872.7	617.1						
	94.0	701.0	495.7						
	66.2	552.5	390.7						
	33.8	421.2	299.9						
0.50	140.8	2409.0	1703.4	532.70	567.58	0.0518	0.0516	3258.02	0.0609
	135.0	1568.9	1109.4						
	116.3	1278.7	904.2						
	94.0	1027.0	726.2						
	66.2	809.5	572.4						
	33.8	621.4	439.4						
0.25	140.8	4703.2	3325.7	449.87	474.33	0.0514	0.0583	2080.46	0.0790
	135.0	3063.1	2165.9						
	116.3	2496.4	1765.3						
	94.0	2005.1	1417.8						
	66.2	1580.5	1117.6						
	33.8	1213.3	857.9						
0.25	140.8	4703.2	3325.7	341.24	390.88	0.0510	0.0579	1288.72	0.0622
	135.0	3063.1	2165.9						
	116.3	2496.4	1765.3						
	94.0	2005.1	1417.8						
	66.2	1580.5	1117.6						
	33.8	1213.3	857.9						

Tabla4.39. Resistencias de los sistemas, $N = 25, \alpha = 0.75$

En la figura 4.58 se presenta una curva de capacidad que ilustra el comportamiento característico de los modelos $\alpha = 0.75$. Se observa que la alta rigidez lateral del sistema total se mantiene prácticamente con poco cambio durante el análisis estático no lineal. El sistema disipador comienza a disipar energía a distorsiones de azotea similares a los casos II y III. En términos generales, el desempeño es mediocre, y los desplazamientos máximos que causan el daño de vigas y columnas son bajos, de apenas 14 cm para una estructura que tiene una altura de 100 m.

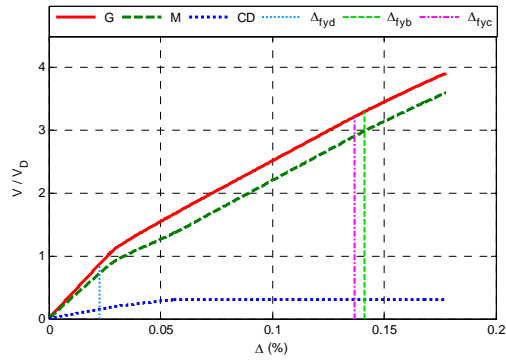


Figura 4.58. Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.59 se presenta un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas característico de los modelos $\alpha = 0.75$, los cuales tienen el mayor número de articulaciones plásticas de las tres relaciones α . El daño del sistema gravitacional se concentra en la parte media de la estructura. La variación del parámetro β no tiene un impacto en la formación de articulaciones plásticas. Las ductilidades desarrolladas por los dispositivos histeréticos están en el intervalo de seis a diez para la mayoría de los entrepisos.

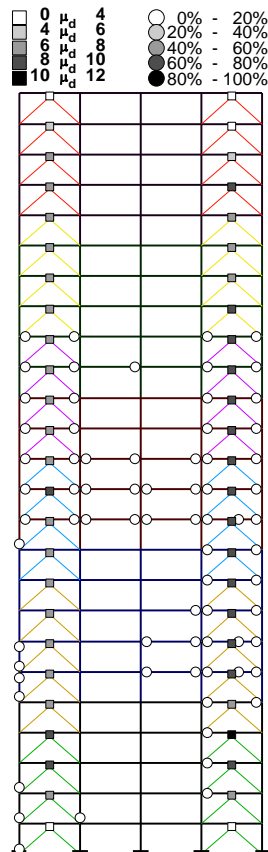


Figura 4.59. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO II ($\alpha = 0.5$) Cuando el sistema gravitacional aporta la mitad de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta la otra mitad de la rigidez lateral total

En la tabla 4.23 se reportan los modelos $\alpha = 0.5$, los cuales no son viables en términos constructivos para la configuración del sistema disipador que se viene estudiando.

25 Niveles $\alpha = 0.50$ $Peso = 39,330\ t$													
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional									
	designación	área (cm²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal						
				vigas	<i>hxb</i>	Lecho A-	zona plástica		zona elástica				
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos				
						col.				c1xc2	barras totales		
1.00	-	2250.7	CV1	V1	120x75	8 #8 + 12 #10	240	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
	-	1465.8	CV2			20 #10							
	-	1194.7	CV3	C1	200x200	144 de #12	200	#8 en 10 ramas @5	#8 en 10 ramas @5				
	-	959.5	CV4										
	-	756.3	CV5										
	-	580.6	CV6	V2	115x70	7 #8 + 11 #10	230	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
-	2932.7	CV1	18 #10										
0.75	-	1910.0	CV2	C2	180x180	112 de #12	360	#8 en 8 ramas @5	#8 en 8 ramas @5				
	-	1556.7	CV3										
	-	1250.3	CV4										
	-	985.5	CV5	V3	110x65	6 #8 + 10 #10	220	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
	-	756.6	CV6			16 #10							
	0.50	-	4296.8	CV1	C3	160x160	88 de #12	320	#8 en 8 ramas @5	#8 en 8 ramas @5			
-		2798.4	CV2										
-		2280.7	CV3										
-		1831.9	CV4	V4	105x60	5 #8 + 9 #10	210	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15				
-		1443.9	CV5			14 #10							
-		1108.5	CV6	C4	140x140	64 de #12	280	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5				
0.25	-	8388.9	CV1										
	-	5463.5	CV2	V5	100x55	4 #8 + 8 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15				
	-	4452.8	CV3			12 #10							
	-	3576.5	CV4			48 de #12	240	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5				
	-	2819.1	CV5	C5	120x120								
	-	721.4	CV6										

Tabla 4.40. Resumen de diseño, $N = 25$, $\alpha = 0.5$

Las resistencias de los modelos $\alpha = 0.5$ se reportan en la tabla 4.24. Recordando que lo único que varía es el sistema disipador, las mismas observaciones hechas en el caso I son válidas para este conjunto.

β	25 niveles			$\alpha = 0.50$		$V_D = 1314.5\ t$			
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n\ (t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	328.6	3785.5	2676.8	714.26	777.56	0.0456	0.0560	6909.05	0.0675
	315.0	2465.4	1743.3						
	271.3	2009.3	1420.8						
	219.2	1613.9	1141.2						
	154.4	1272.1	899.5						
	79.0	976.6	690.5						
0.75	328.6	4932.7	3487.9	620.83	668.62	0.0523	0.0522	4793.60	0.0602
	315.0	3212.5	2271.6						
	271.3	2618.2	1851.4						
	219.2	2103.0	1487.0						
	154.4	1657.6	1172.1						
	79.0	1272.5	899.8						
0.50	328.6	7226.9	5110.2	532.70	567.58	0.0518	0.0516	3258.02	0.0609
	315.0	4706.7	3328.1						
	271.3	3836.0	2712.5						
	219.2	3081.1	2178.7						
	154.4	2428.6	1717.3						
	79.0	1864.4	1318.3						
0.25	328.6	14109.7	9977.1	449.87	474.33	0.0514	0.0583	2080.46	0.0790
	315.0	9189.3	6497.8						
	271.3	7489.4	5295.8						
	219.2	6015.4	4253.6						
	154.4	4741.5	3352.8						
	79.0	3639.9	2573.8						
	328.6	14109.7	9977.1	341.24	390.88	0.0510	0.0579	1288.72	0.0622
	315.0	9189.3	6497.8						
	271.3	7489.4	5295.8						
	219.2	6015.4	4253.6						
	154.4	4741.5	3352.8						
	79.0	3639.9	2573.8						

Tabla 4.41. Resistencias de los sistemas, $N = 25$, $\alpha = 0.5$

La curva de capacidad típica para los modelos $\alpha = 0.5$ se presenta en la figura 4.60. Las columnas fluyen a distorsiones de apenas 0.1%, asociado a un desplazamiento total de la estructura de apenas 10 cm, producto de la interacción del sistema gravitacional y el sistema disipador, lo que resulta contraproducente para la integridad de los elementos estructurales.

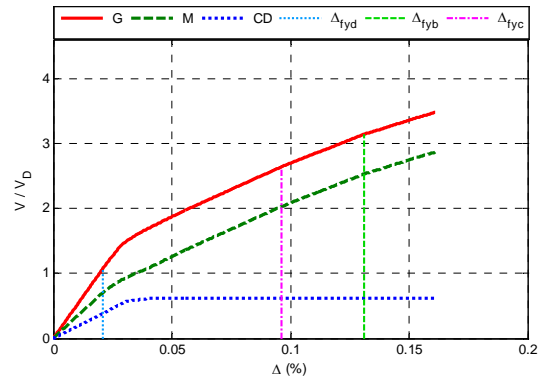


Figura 4.60. Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

Con base en el estudio de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de los modelos $\alpha = 0.5$ (figura 4.61), son aplicables las mismas observaciones hechas para el caso I.

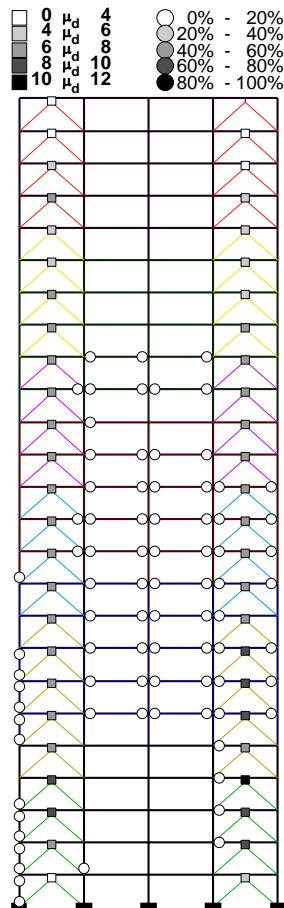


Figura 4.61. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

CASO III ($\alpha=0.25$) Cuando el sistema gravitacional aporta $\frac{1}{4}$ de la rigidez lateral total, y por consecuencia, el sistema disipador aporta $\frac{3}{4}$ de la rigidez lateral total

Los modelos del caso III son utópicos desde el punto de vista de diseño y construcción. En la tabla 4.42 se reportan los detalles de diseño.

25 Niveles $\alpha = 0.25$ <i>Peso = 39,330 t</i>													
β	Sistema de contraventeo			Sistema gravitacional									
	designación	área (cm²)	sec.	sec.	dimensiones (cm)	acero longitudinal	acero transversal						
				vigas	hxb	Lecho A-	zona plástica		zona elástica				
						Lecho A+	confinamiento (cm)	estribos	estribos				
						col.				c1xc2	barras totales		
1.00	-	6752.1	CV1	V1	120x75	8 #8 + 12 #10	240	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
	-	4397.5	CV2			20 #10							
	-	3584.0	CV3	C1	200x200	144 de #12	200	#8 en 10 ramas @5	#8 en 10 ramas @5				
	-	2878.6	CV4										
	-	2269.0	CV5										
	-	1741.9	CV6	V2	115x70	7 #8 + 11 #10	230	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
-	8798.1	CV1	18 #10										
0.75	-	5730.0	CV2	C2	180x180	112 de #12	360	#8 en 8 ramas @5	#8 en 8 ramas @5				
	-	4670.0	CV3										
	-	3751.0	CV4										
	-	2956.6	CV5	V3	110x65	6 #8 + 10 #10	220	#4 en 6 ramas @10	#4 en 6 ramas @15				
	-	2269.7	CV6			16 #10							
	0.50	-	12890.3	CV1	C3	160x160	88 de #12	320	#8 en 8 ramas @5	#8 en 8 ramas @5			
-		8395.1	CV2										
-		6842.2	CV3										
-		5495.6	CV4	V4	105x60	5 #8 + 9 #10	210	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15				
-		4331.8	CV5			14 #10							
-		3325.4	CV6	C4	140x140	64 de #12	280	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5				
0.25	-	25166.8	CV1										
	-	16390.5	CV2	V5	100x55	4 #8 + 8 #10	200	#4 en 4 ramas @10	#4 en 4 ramas @15				
	-	13358.5	CV3			12 #10							
	-	10729.5	CV4			48 de #12	240	#6 en 6 ramas @5	#6 en 6 ramas @5				
	-	8457.3	CV5	C5	120x120								
	-	6492.4	CV6										

Tabla 4.42. Resumen de diseño, $N = 25$, $\alpha = 0.25$

En la tabla 4.26 se reportan las resistencias de los modelos del caso III, el cual comparte el mismo sistema gravitacional con el resto de los casos y el sistema disipador. Como se observa, es utópico.

β	25 niveles $\alpha = 0.25$ $V_D = 1574.4 t$								
	Sistema disipador			Sistema gravitacional					
	dispositivo	contraventeo		vigas				columnas	
	$V_n(t)$	$P_R(t)$	$V_R(t)$	M_y^+ (t-m)	M_y^- (t-m)	θ_p^+	θ_p^-	M_p (t-m)	θ_p
1.00	590.4	11356.6	8030.3	714.26	777.56	0.0456	0.0560	6909.05	0.0675
	565.8	7396.3	5230.0						
	486.9	6028.1	4262.5						
	393.0	4841.7	3423.6						
	276.0	3816.4	2698.6						
	140.0	2929.7	2071.6						
0.75	590.4	14798.0	10463.8	620.83	668.62	0.0523	0.0522	4793.60	0.0602
	565.8	9637.6	6814.8						
	486.9	7854.7	5554.1						
	393.0	6308.9	4461.1						
	276.0	4972.8	3516.3						
	140.0	3817.5	2699.4						
0.50	590.4	21680.8	15330.6	532.70	567.58	0.0518	0.0516	3258.02	0.0609
	565.8	14120.1	9984.5						
	486.9	11508.1	8137.5						
	393.0	9243.3	6536.0						
	276.0	7285.8	5151.8						
	140.0	5593.1	3954.9						
0.25	590.4	42329.1	29931.2	449.87	474.33	0.0514	0.0583	2080.46	0.0790
	565.8	27567.9	19493.5						
	486.9	22468.2	15887.4						
	393.0	18046.4	12760.7						
	276.0	14224.6	10058.3						
	140.0	10919.8	7721.5						
	590.4	42329.1	29931.2	341.24	390.88	0.0510	0.0579	1288.72	0.0622
	565.8	27567.9	19493.5						
	486.9	22468.2	15887.4						
	393.0	18046.4	12760.7						
	276.0	14224.6	10058.3						
	140.0	10919.8	7721.5						

Tabla4.43. Resistencias de los sistemas, $N = 25, \alpha = 0.25$

El comportamiento de las curvas de capacidad de los modelos del caso III (figura 4.62) no es satisfactorio, por razones similares a las fundamentadas para el caso II de los modelos de 20 niveles.

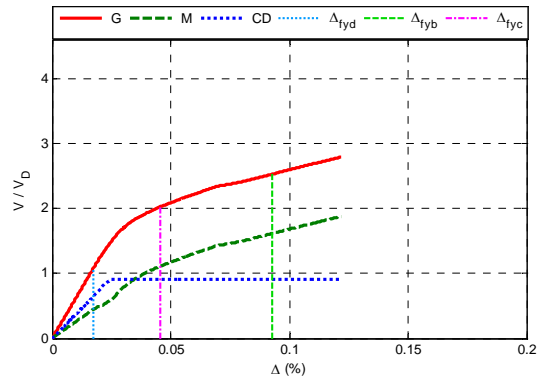


Figura 4.62. Curva de capacidad global, $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

En la figura 4.63 se muestra un mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas típico de los modelos $\alpha = 0.25$, los cuales presentan las mismas características que los modelos de 20 niveles equiparables.

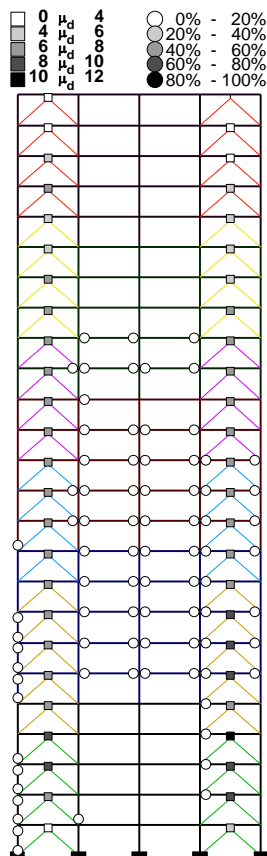


Figura 4.63. Mapeo de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas, $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

4.8.1. Observaciones generales para los modelos de 25 niveles

Los modelos que presentan mayor ductilidad y sobrerresistencia, de cada caso de estudio, se reportan en las figuras de esta sección. Los modelos correspondientes son: $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$; $N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$ y $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$. Los resultados completos se incluyen en el Apéndice A.

4.8.1.1. Ductilidades y sobrerresistencias encontradas con los análisis estáticos no lineales

Respecto a los resultados que se reportan en las tablas 4.35, 4.36 y 4.37, se hacen las mismas observaciones que para los modelos de veinte niveles.

5 Niveles $\alpha = 0.75$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	4.50	7.81	4.47	7.39	4.46	7.17	0.9465
0.75	4.69	8.40	4.65	7.92	4.59	7.58	0.9420
0.50	4.89	9.07	4.96	8.92	5.01	8.84	0.9364
0.25	5.15	9.84	5.12	9.29	5.26	9.58	0.9287

Tabla 4.44. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 25, \alpha = 0.75$

5 Niveles $\alpha = 0.5$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	3.26	7.75	3.36	7.56	3.34	7.48	0.8831
0.75	3.37	8.26	3.46	8.04	3.52	7.94	0.8791
0.50	3.48	8.75	3.56	8.52	3.62	8.41	0.8742
0.25	3.64	9.42	3.71	9.16	3.76	9.05	0.8679

Tabla 4.45. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 25, \alpha = 0.5$

5 Niveles $\alpha = 0.25$							Periodo elástico
β	K_2 0%		K_2 3%		K_2 5%		
	R	Q	R	Q	R	Q	
1.00	2.61	7.07	2.68	6.69	2.72	6.53	0.8393
0.75	2.65	7.37	2.73	7.01	2.75	6.81	0.8364
0.50	2.71	7.71	2.77	7.31	2.80	7.09	0.8335
0.25	2.78	8.09	2.83	7.61	2.85	7.38	0.8301

Tabla 4.46. Ductilidades y sobrerresistencias, $N = 25, \alpha = 0.25$

4.8.1.2. Relaciones de rigidez óptimas entre el sistema gravitacional y el sistema disipador

Del análisis de los mapeos de fluencias inelásticas y articulaciones plásticas de todos los casos de estudio, como los que se presentan en la figura 4.64, se establecen las mismas observaciones que las hechas para los modelos de veinte niveles.

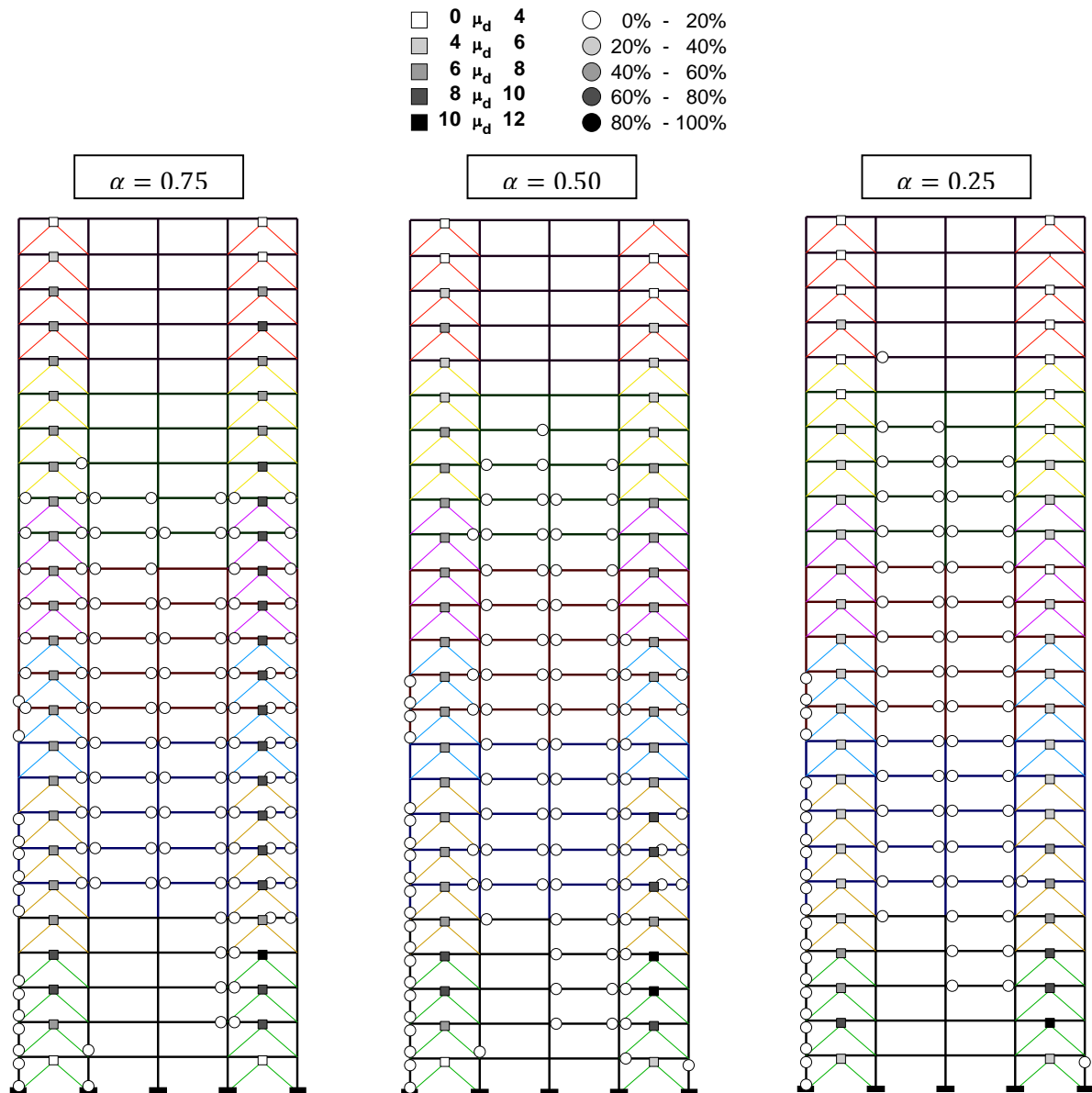


Figura 4.64. Mapeo fluencias inelásticas y de articulaciones plásticas, $N = 25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Del análisis conjunto de los mapeos de articulaciones plásticas (figura 4.64), curvas de capacidad global (figura 4.65) y envolventes de distorsión por entrepiso (figuras 4.66, 4.67 y 4.68), se hacen las mismas observaciones que en los modelos de veinte niveles.

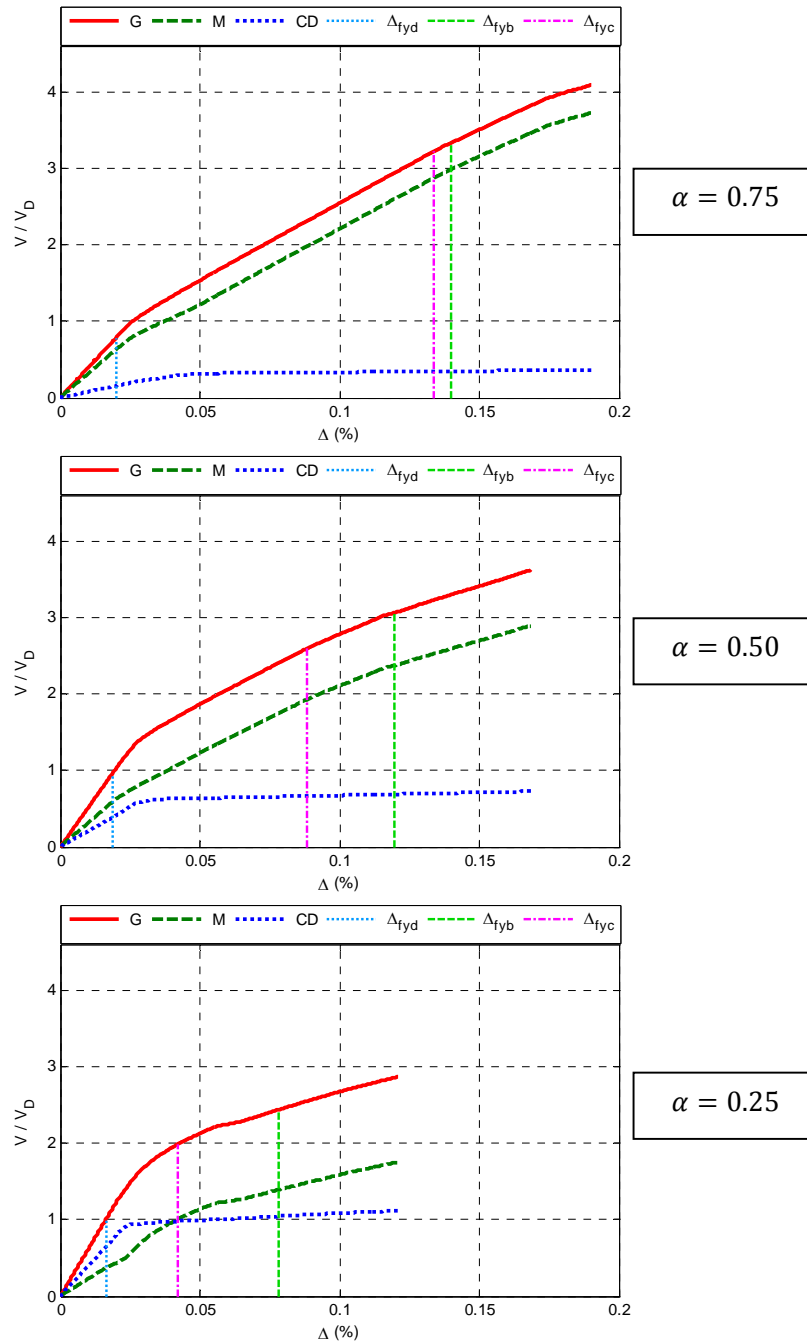


Figura 4.65 Curva de capacidad modelos. $N = 25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

Los cortantes de diseño con respecto a los cuales están normalizadas las curvas de capacidad son:

- Caso I ($\beta = 0.75$) $V_D = 1126.8 t$
- Caso II ($\beta = 0.5$) $V_D = 1314.5 t$
- Caso III ($\beta = 0.25$) $V_D = 1574.4 t$

En las figuras 4.66, 4.67 y 4.68 se presentan las curvas de capacidad por entrepisos para los modelos que se vienen mostrando. Se observa que en todos los entrepisos, la relación de rigidez es consistente, las curvas son estables, y no se aprecia concentraciones de fuerzas en ningún entrepiso.

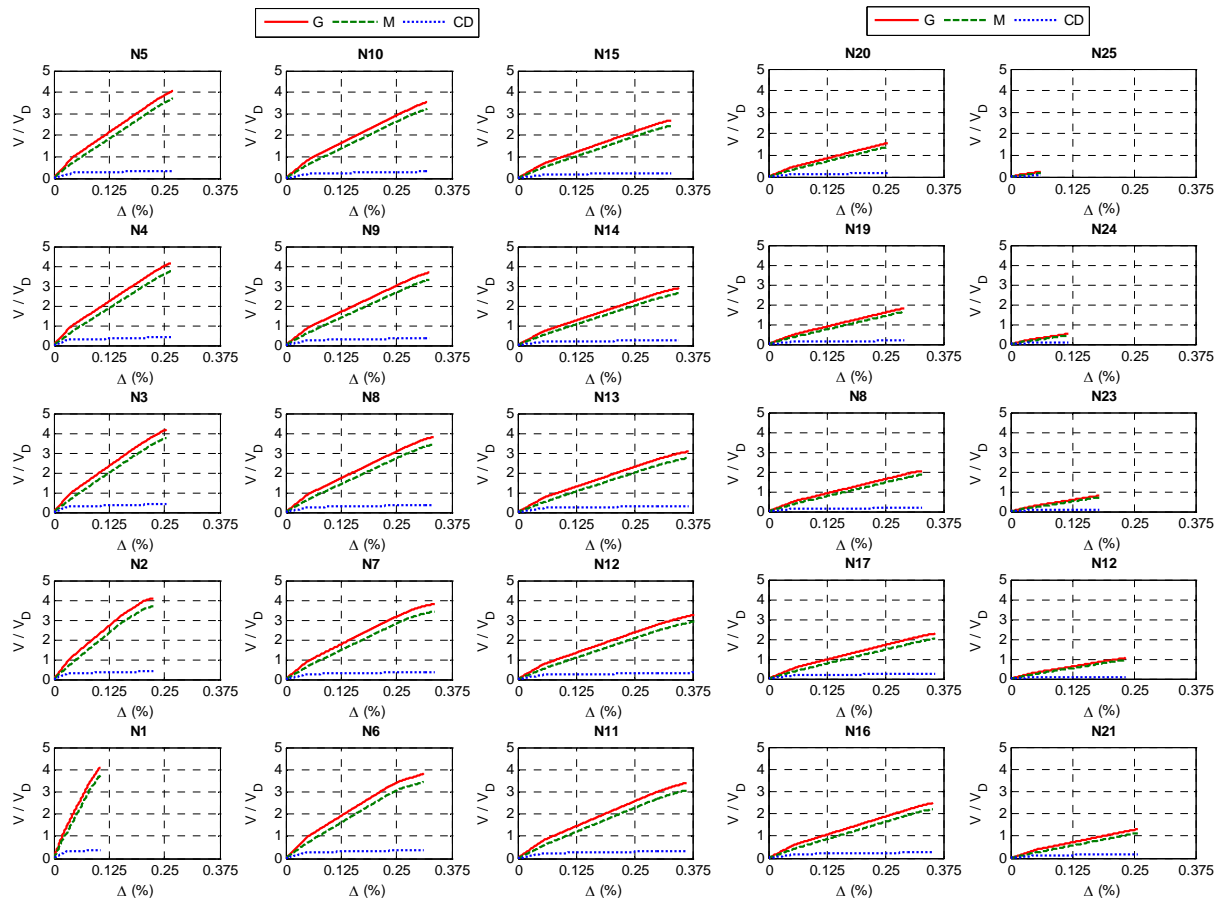


Figura 4.66 Curvas de capacidad por entrepisos modelos
 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

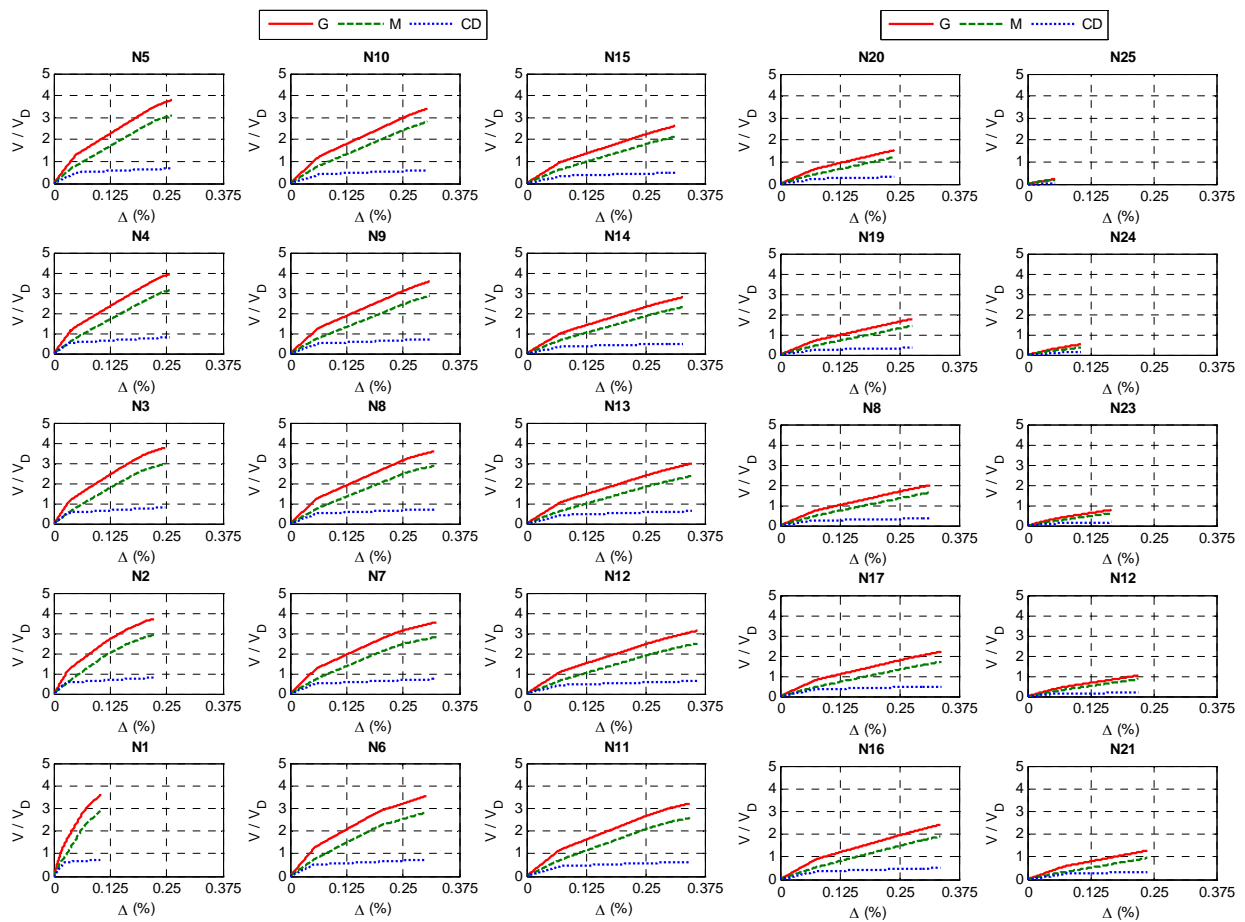


Figura 4.67 Curvas de capacidad por entresijos modelos

$$N = 25, \alpha = 0.50, \beta = 0.25 \text{ y } K_2 = 5\%$$

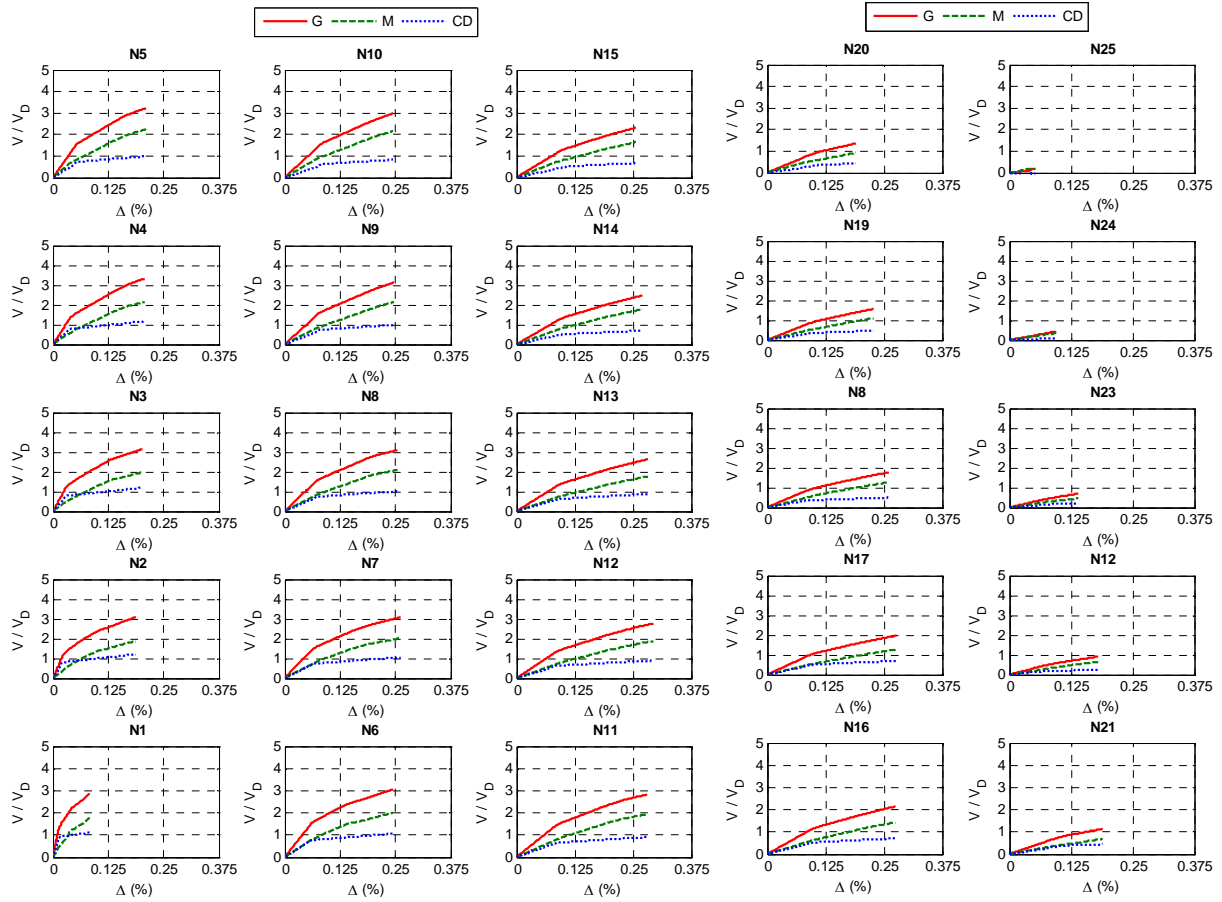


Figura 4.68 Curvas de capacidad por entresijos modelos

$$N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25 \text{ y } K_2 = 5\%$$

En cuanto a las distorsiones del sistema total que ocasionan que los dispositivos histeréticos comiencen a disipar energía, y la distorsión en la cual alcanzan su ductilidad objetivo (figura 4.69), se observa que para los casos I y II, las distorsiones de fluencia y finales son aproximadamente iguales; para el caso III las distorsiones de fluencia son menores.

Las relaciones de rigidez $\alpha = 0.25$ y $\alpha = 0.50$ son inviables en términos constructivos, y los modelos tienen un desempeño malo con formación de mecanismos indeseados. En cuanto a la relación $\alpha = 0.75$, su desempeño es insatisfactorio y el sistema disipador es contraproducente para el desempeño estructural, de manera tal que no se justifica la implantación del sistema disipador. Debido a estas razones, ninguna relación es adecuada para los modelos de 25 niveles con la configuración del sistema disipador en estudio.

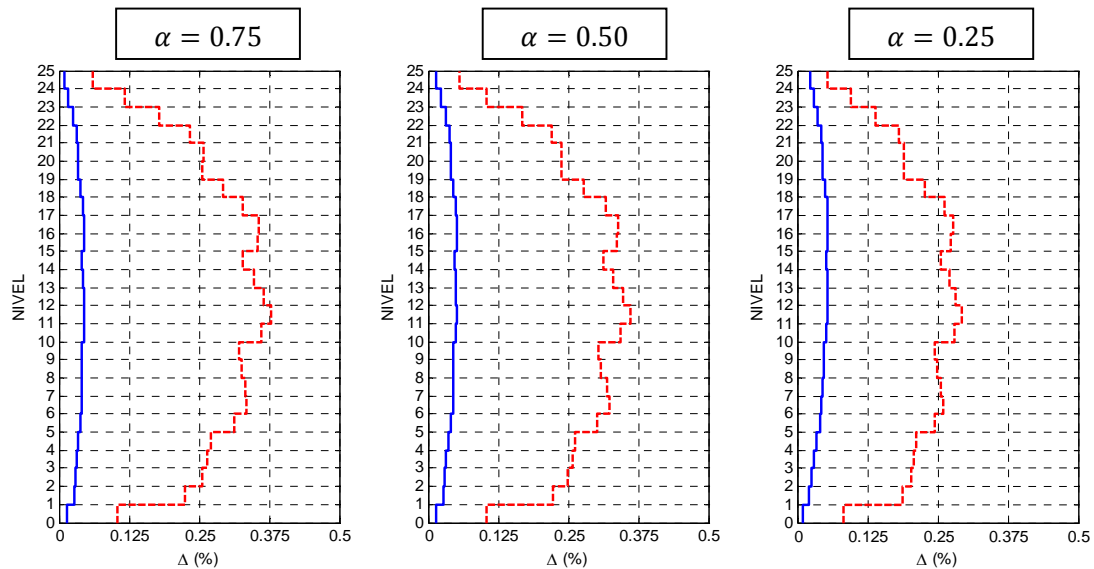


Figura 4.69. Envolventes de distorsiones de entrepisos. $N = 25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

4.8.1.3. Relaciones de rigidez óptimas entre el dispositivo histerético y el sistema disipador

El parámetro β tiene el mismo impacto que en los modelos de veinte niveles.

4.8.1.4. Relaciones de resistencia requeridas del sistema gravitacional y del sistema disipador

Las observaciones hechas en los modelos de veinte niveles son válidas para los modelos de veinticinco niveles.

4.8.1.5. Ductilidades recomendadas para los disipadores de energía, μ_d

Las recomendaciones hechas para los modelos de veinte niveles, en cuanto a las ductilidades del sistema disipador, son aplicables para los modelos de veinticinco niveles.

4.8.1.6. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite de servicio

No se hacen recomendaciones, debido a la pobreza en el desempeño de todos los modelos de veinticinco niveles.

4.8.1.7. Distorsión de entrepiso para revisión del estado límite operacional

No se hacen recomendaciones, debido a la pobreza en el desempeño de todos los modelos de veinticinco niveles.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Resumen

En este trabajo se evaluó la factibilidad de diseño y construcción de 60 edificios distintos, constituidos con marcos dúctiles de concreto y adicionados con un sistema disipador. La interacción de ambos sistemas se proyectó utilizando criterios de diseño por capacidad. Los modelos tienen: a) cinco diferentes alturas (5, 10, 15, 20 y 25 niveles), b) tres distintas relaciones de rigidez entre los marcos y el sistema contraviento-disipador ($\alpha = 0.75, \alpha = 0.5$ y $\alpha = 0.25$), c) cuatro relaciones de rigidez entre el sistema de contraviento y el dispositivo histerético ($\beta = 1.0, \beta = 0.75, \beta = 0.5$ y $\beta = 0.25$) y, d) tres valores de pendiente post-fluencia para los dispositivos histeréticos ($K_2 = 0\%, K_2 = 3\%$ y $K_2 = 5\%$).

Se presentaron y compararon los resultados de análisis estáticos no lineales realizados a 180 modelos construidos de los edificios proyectados. La forma de comparar los desempeños de los distintos modelos fue mediante el análisis de: a) curvas de capacidad global, b) mapeos de articulaciones plásticas, c) curvas de capacidad por entrepisos, d) curvas de capacidad de los dispositivos y, e) envolventes de distorsión.

5.2. Conclusiones

Una estructura diseñada correctamente con un sistema disipador de energía controla de manera efectiva las fuerzas laterales, incrementa significativamente la capacidad de disipación de energía del sistema total, y reduce las demandas de disipación de energía del sistema gravitacional. El daño estructural que pudiera exhibir la edificación se repara sustituyendo exclusivamente los dispositivos que hayan fluido significativamente durante una excitación sísmica.

De acuerdo con los objetivos de diseño, es deseable que el sistema gravitacional sufra el menor daño posible, se cumpla el mecanismo columna fuerte-viga débil-dispositivo más débil, y se disipe la mayor cantidad de energía por medio de los dispositivos, con base en esos criterios. Los modelos de cinco y diez niveles tienen el mejor desempeño con la relación $\alpha = 0.25$. Los modelos de quince y veinte niveles tienen el mejor desempeño con la relación $\alpha = 0.5$. Para los modelos de veinticinco niveles, no hay una relación que resulte satisfactoria y justifique la implantación del sistema disipador.

El sistema disipador es sumamente eficiente para disipar energía y mediante los contravientos para convertir las cargas laterales en cargas axiales que se transmiten a las columnas. A medida que se incrementa la altura de la estructura, se encadena una acumulación de fuerzas a tensión y a compresión en las columnas externas del sistema gravitacional, producto de la interacción con el sistema disipador, esto, aunado a la rotación de los marcos, conlleva a diseñar columnas con resistencias muy grandes a flexión y, por consiguiente robustas, que no cumplen con varios requisitos para marcos dúctiles que establecen las NTCC 2004. La acumulación excesiva de fuerzas axiales tiene efectos contraproducentes en el desempeño de las estructuras, principalmente dañando las columnas con mecanismos indeseados. Adicionalmente, conforme aumenta la altura, un número considerable de modelos son de difícil ejecución, desde el punto de vista constructivo y económico.

Los periodos fundamentales elásticos disminuyen en función de la relación β . Esto se debe a que el sistema disipador mantiene su rigidez conforme β disminuye. Sin embargo, internamente aumenta la rigidez de la diagonal y disminuye la rigidez del dispositivo. La reducción de la rigidez de los dispositivos tiene como consecuencia que el sistema gravitacional reciba un daño mayor. El aumento de la rigidez de las diagonales tiene como consecuencia que los disipadores disipen energía a distorsiones menores.

La relación de rigidez β influye en el nivel de distorsión de entrepiso a la cual los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía. A una mayor relación de rigidez (β menor), se reduce la distorsión a la que los dispositivos histeréticos comienzan a disipar energía y, por tanto, la distorsión última de entrepiso es menor. El efecto de la relación β disminuye conforme los modelos aumentan en altura, debido a la deformación a flexión que sufren en su altura las estructuras. Los modelos de cinco y diez niveles tienen un desempeño muy bueno con todas las relaciones β , y todos resultan factibles de construir. Los modelos de quince y veinte niveles, tienen un desempeño similar con todas las relaciones β ; considerando la factibilidad constructiva, lo adecuado es la relación $\beta = 1.0$ para diseñarlos y construirlos. Para los modelos de veinticinco niveles no hay una relación que tenga viabilidad constructiva, y un desempeño que justifique la implantación del sistema disipador.

La ductilidad demandada de los dispositivos histeréticos está interrelacionada con la distorsión de entrepiso. Es una necesidad dotar a los dispositivos histeréticos de la suficiente capacidad de deformación (ductilidad), para permitir que la estructura desarrolle una mayor distorsión global, sin peligro de que los dispositivos se desconecten. Las ductilidades recomendadas para el estado límite operacional están en el intervalo de 10 a 12. El efecto de la pendiente post-fluencia de los dispositivos tiene que tomarse en consideración para el diseño de los elementos de soporte y del sistema gravitacional.

5.3. Recomendaciones

Con base en este estudio, se recomienda, utilizar sistemas disipadores de energía en edificios flexibles. Un sistema gravitacional esbelto, con cuantías en vigas y columnas cercanas a los máximos permitidos por las NTCC 2004, elevan la posibilidad de no sufrir daños en el sistema gravitacional y tolerar las deformaciones necesarias para que el sistema disipador concentre todo el daño. Es importante tener una relación deformación-resistencia alta en el sistema gravitacional, es decir, un sistema que tolere deformaciones altas sin que incurse en el estado no lineal.

La variación de la rigidez en los cambios de sección del sistema gravitacional debe ser baja del orden del 15% para un comportamiento estable, controlado y consistente del sistema gravitacional ante cargas laterales.

Aunque no se estudió en este trabajo, la distribución y ubicación de los dispositivos histeréticos es relevante para el desempeño de la estructura. Un mayor número de crujías contraventeadas mejoraría notablemente la distribución de las fuerzas axiales en las columnas. Concentrar el sistema disipador en las crujías centrales de los marcos exteriores, disminuiría el nivel de carga axial actuante en las columnas externas. Estas recomendaciones de distribución y ubicación permitirían diseñar edificios de mayor altura con una relación de rigidez α menor y, en consecuencia, disipar mayor cantidad de energía por medio de los dispositivos histeréticos, disminuyendo el daño en el sistema gravitacional.

La más terrible consecuencia de los terremotos es la pérdida masiva de vidas humanas. La primera tarea de la protección contra terremotos, es reducir la pérdida de vidas humanas, y la técnica actual, en ingeniería estructural, bien aplicada, nos permite salvaguardar la integridad física de los ocupantes de una estructura.

Las consecuencias económicas y sociales son de largo alcance, y nos dan un poderoso argumento para la mitigación del riesgo sísmico con sistemas disipadores de energía, que nos permitan reducir el impacto económico y social. La escala de las pérdidas económicas es considerable y, para mucha gente y organizaciones afectadas, las pérdidas económicas individuales son devastadoras financieramente. La adquisición de un bien inmueble es una de las inversiones económicas más importantes que se pueden hacer, es una cuestión de responsabilidad financiera y de seguridad para los ocupantes, hacer una elección concienzuda.

REFERENCIAS

- Aiken, I. D.; Nims, D. K., Whittaker, A. y Kelly, J. M. (1993), "Testing of passive energy dissipation systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3.
- Bazán, E. y Meli, R. (2008), *Diseño sísmico de edificios*. México, Limusa.
- Constantinou, M. C. (1994), "Principles of friction, viscoelastic, yielding steel and fluid viscous dampers: properties and design", en Soong, T.T. (comp.), *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, Springer-Verlag, Viena.
- Esteva, L., Ruiz, S. y Rivera, J. (2005), "Reliability-and performance-based seismic design of structures with energy-dissipating devices", *9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Kobe, Japón, junio 13-16, 2005.
- FEMA 356 (2000), "Federal Emergency Management Agency", Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, noviembre.
- Godínez, E. A. y Tena A. (2011), "Comportamiento no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico Chevron. Propuesta de diseño", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 85, pp. 61-102.
- González, R. (1990), "Respuesta de estructuras provistas de dispositivos externos de disipación de energía tipo solera", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 40, 47-74.
- Jara, J. M. (1994), "Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 47, 35-79.
- Lawson, R., Vance, V. y Krawinkler, H. (1994), "Nonlinear static push-over analysis- why, when, and how?", *Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering: EERI 5 NCEE : Earthquake Awareness and Mitigation Across the Nation*, Julio 10-14, Chicago, Illinois.
- MOC-2008 (2008), "Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- Nangullasmú, H. J. y Tena, A. (2013), "Procedimiento de diseño conforme a reglamento para marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos", *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, CD-ROM.
- Nangullasmú, H. J. (2011), "Propuesta de criterios de diseño sísmico conforme a reglamento para marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores histeréticos", *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, diciembre.
- NTCC-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.

NTCM-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Metálicas" *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.

NTCS 2004 "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre.

Paulay, T. (1996), "Seismic design of concrete structures the present needs of societies", *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, junio.

Ruiz, S. (2002), "Algunas recomendaciones para el diseño de edificios con disipadores de energía", *VII-Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Cuernavaca, México, CDROM.

Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. y Chung, R. (1996), *Passive energy dissipation devices for seismic applications*, Monograph NISTIR 5923, National Institute of Standards and Technology.

Soong, T.T. y Spencer Jr., B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 243-259.

Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., y McNamara, R.J. (2008), "Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments", *Journal of Structural Engineering*, ASCE.

Tena, A. (2000), "Modelado analítico de edificios con disipadores de energía" en *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 62, pp. 29-62.

Tena, A., (2003), "Disipación pasiva de energía en México: Un estado del arte", *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Barquisimeto, Venezuela, 38 p..

Tena-Colunga, A. (2008), "State of the art and state of the practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in Mexico", *10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Istanbul, Turquía, mayo, pp. 28-31.

Tena, A., Gatica, G., Urbina, L. y Victoria, L. (2012), "Impacto de la disposición de vigas secundarias en losas perimetralmente apoyadas en el comportamiento sísmico de edificios diseñados con base en marcos de concreto reforzado" *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 17, pp. 66-85.

Tena, A. (2014), "Sistemas de control de la respuesta sísmica", *Notas de Clase*, Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Terán, A. y Virto, N. (2009), "Diseño basado en desplazamientos de edificaciones bajas rigidizadas con contravientos desadheridos" *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 80, pp. 1-29.

Terán, A. (2014), "Diseño Sismorresistente", *Notas de Clase*, Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Torres, M. y Ruiz, S. (2004), "Design algorithm based on probabilistic seismic demands for buildings rehabilitated with hysteretic energy-dissipating devices", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, pp. 503-521, mayo.

Uang, C.-M. y Nakashima, M. (2003), "Steel buckling restrained braced frames", en Yousef Bozorgnia y Vitelmo V. Bertero, *Earthquake engineering, Recent advances an applications*, CRC Press.

Whittaker, A., Constantinou, M. y Sigaher, N. (1999), "Supplemental damping for new and retrofit construction", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 61, pp. 1-21.

Whittaker, A. S.; Bertero, V. V.; Thompson, C. L. and Alonso, L. J. (1991). Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), pp. 563-604.

Whittaker, A. S., Bertero, V.V., Alonso, J. y Thompson, C.L. (1989), "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", *Report No. UCB/EERC-89 /02*. University of California, Berkeley.

Wu, C. X., Zhou, Y.; Tong, J.G. y Han, J.J. (2012), "Study on the seismic performance of X-added damping and stiffness energy dissipation device", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, septiembre.

Xie, Q. (2004), "State of the art of buckling-restrained braces in Asia", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp. 727-748.

APÉDICE A

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS NO-LINEALES

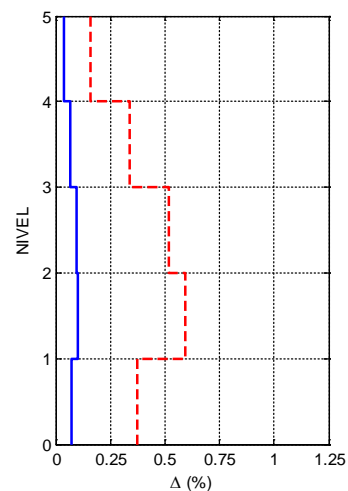
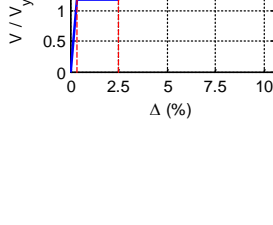
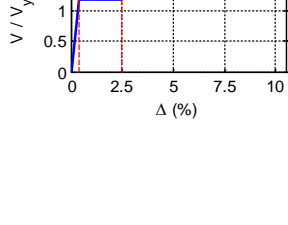
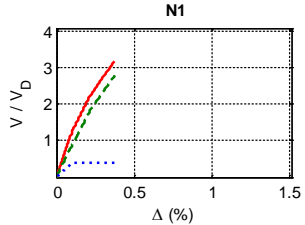
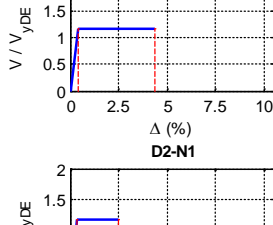
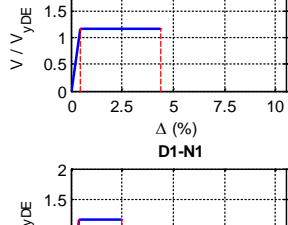
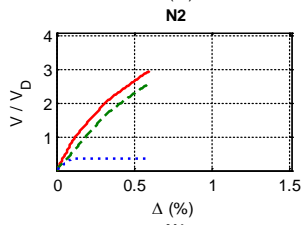
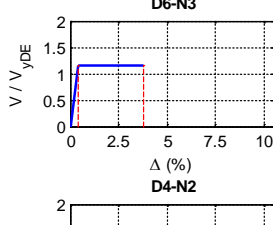
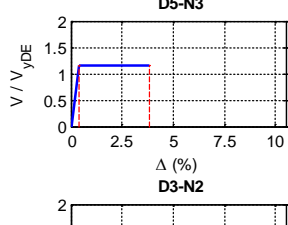
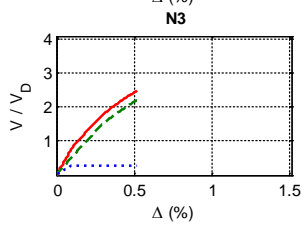
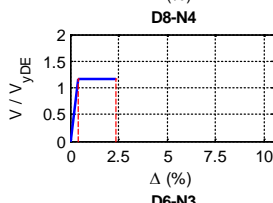
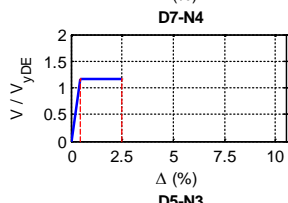
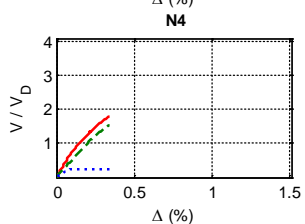
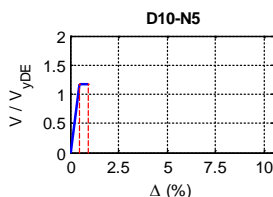
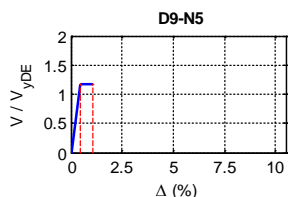
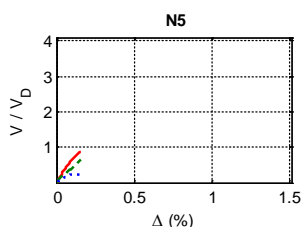
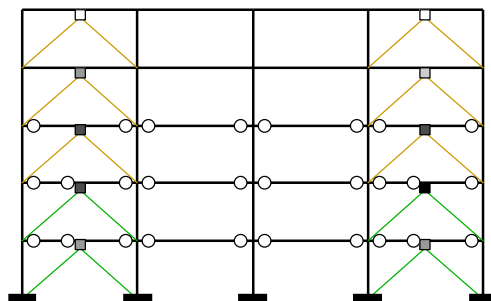
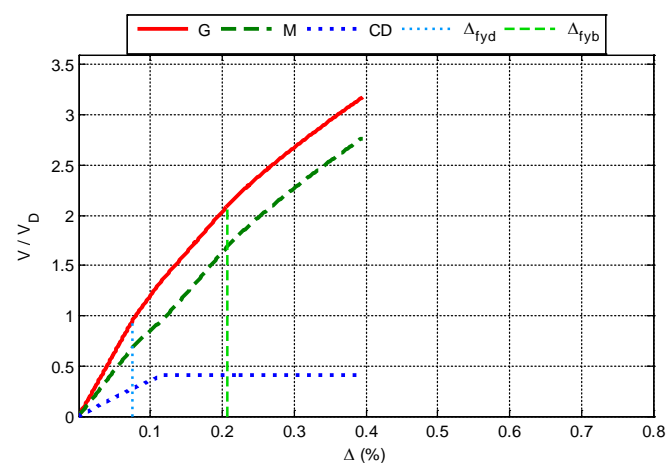


Figura A.1 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

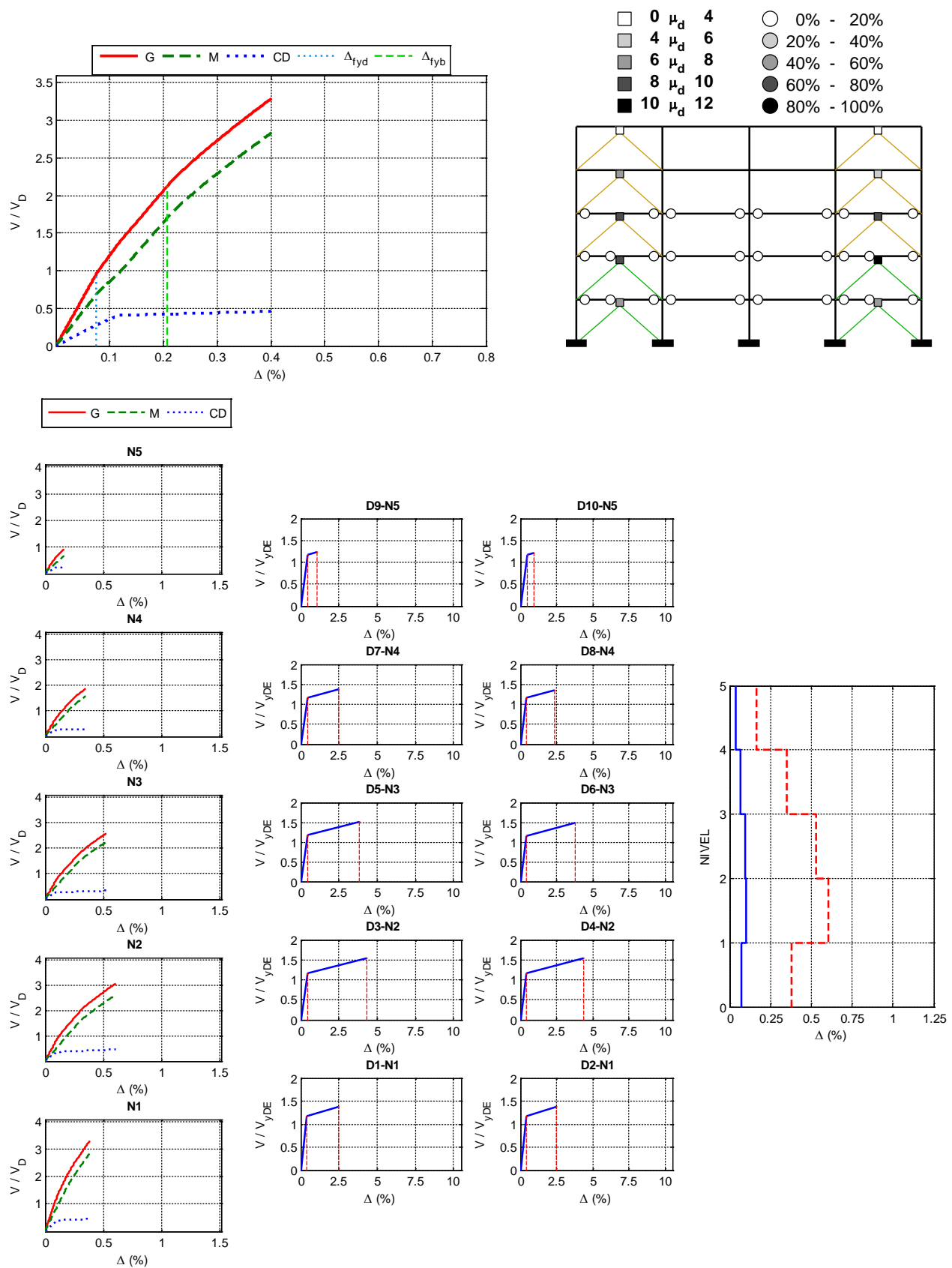


Figura A.2 $N = 5$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

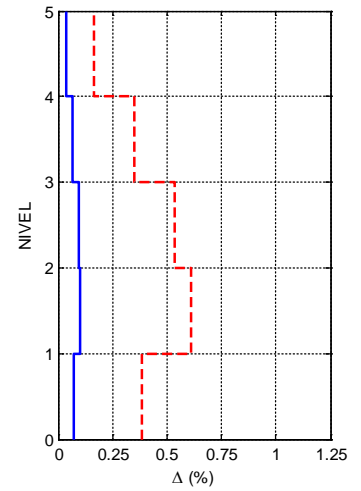
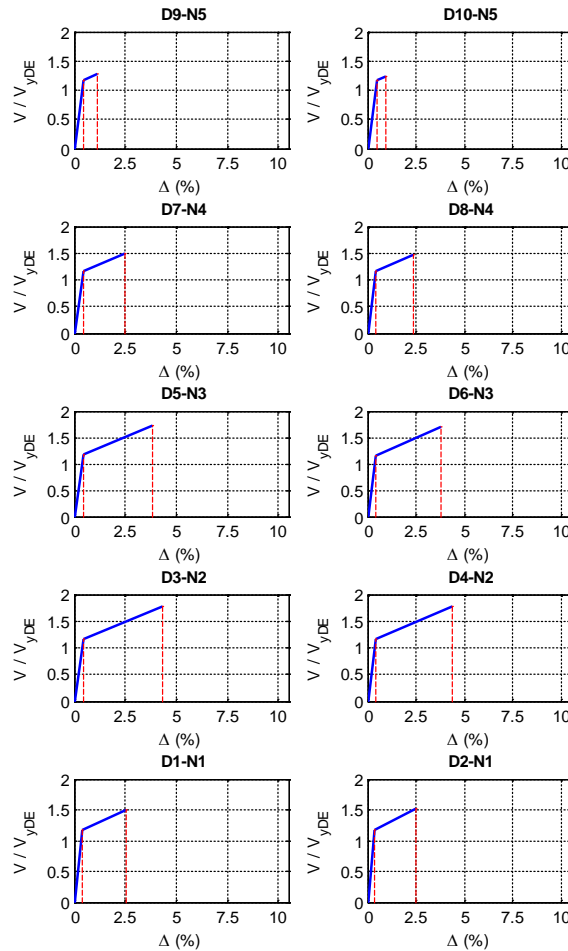
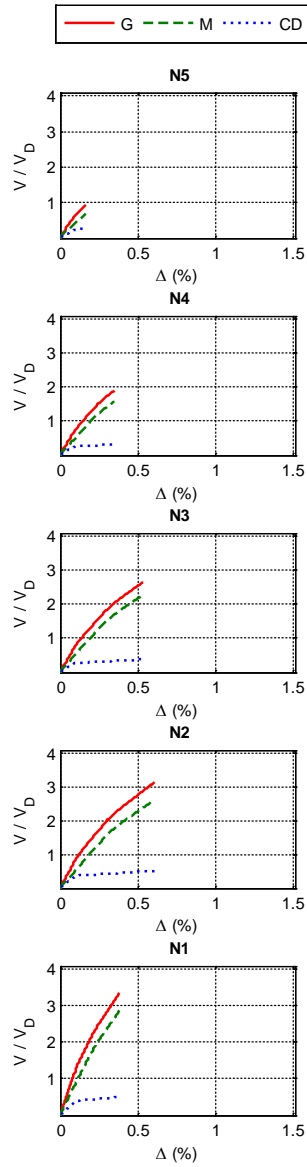
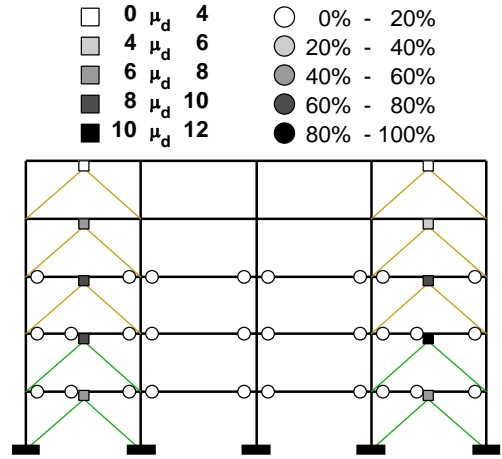
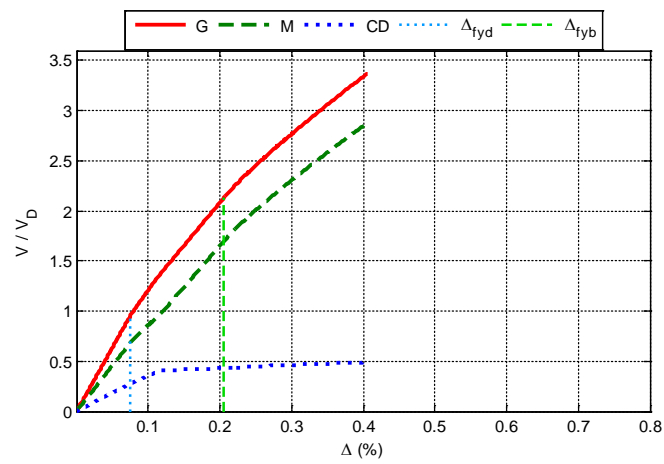


Figura A.3 $N = 5$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

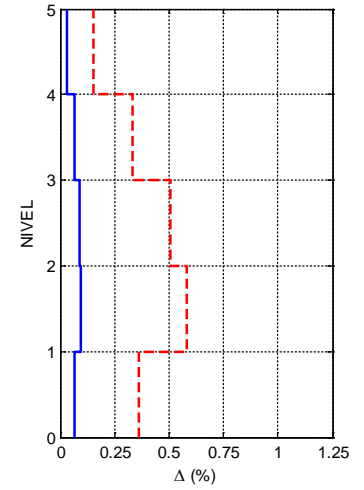
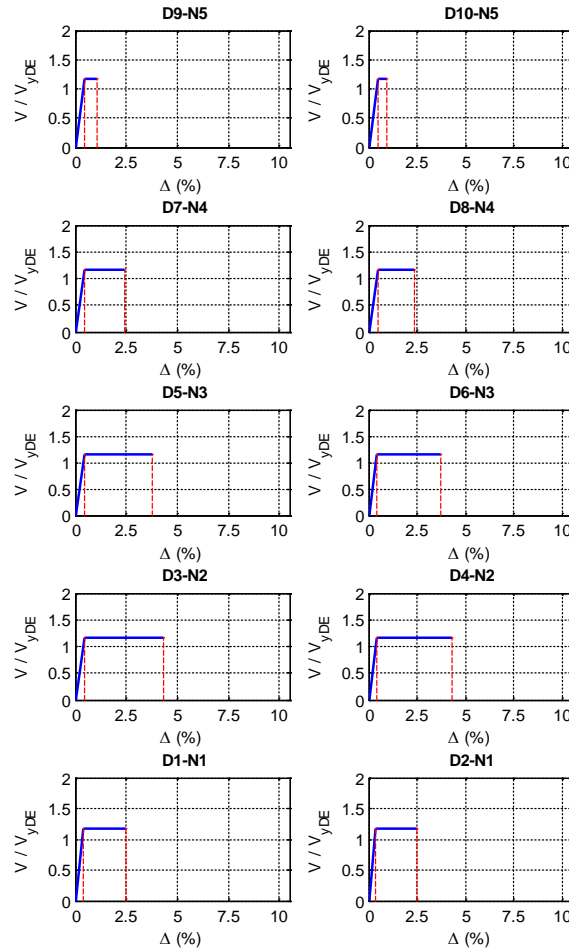
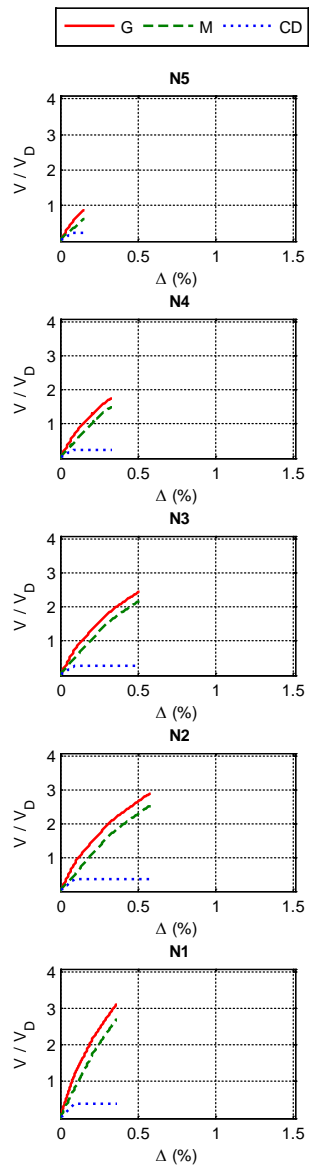
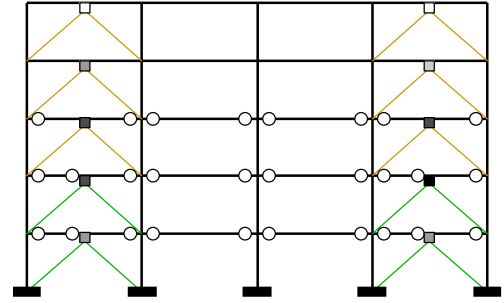
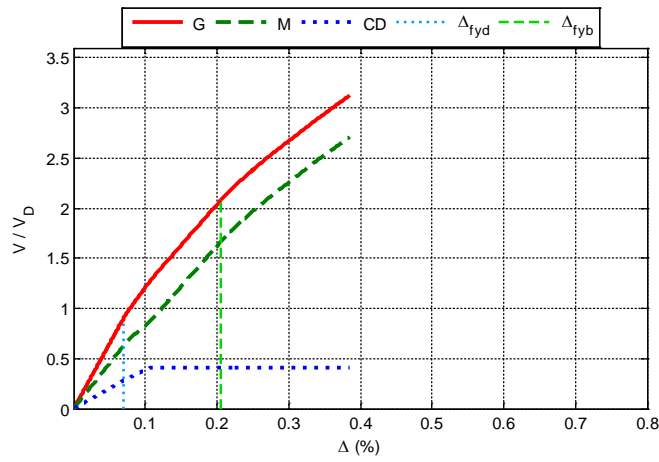


Figura A.4 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

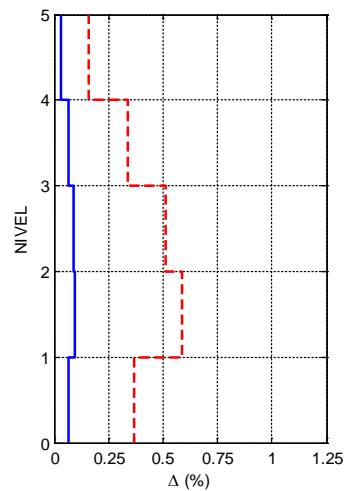
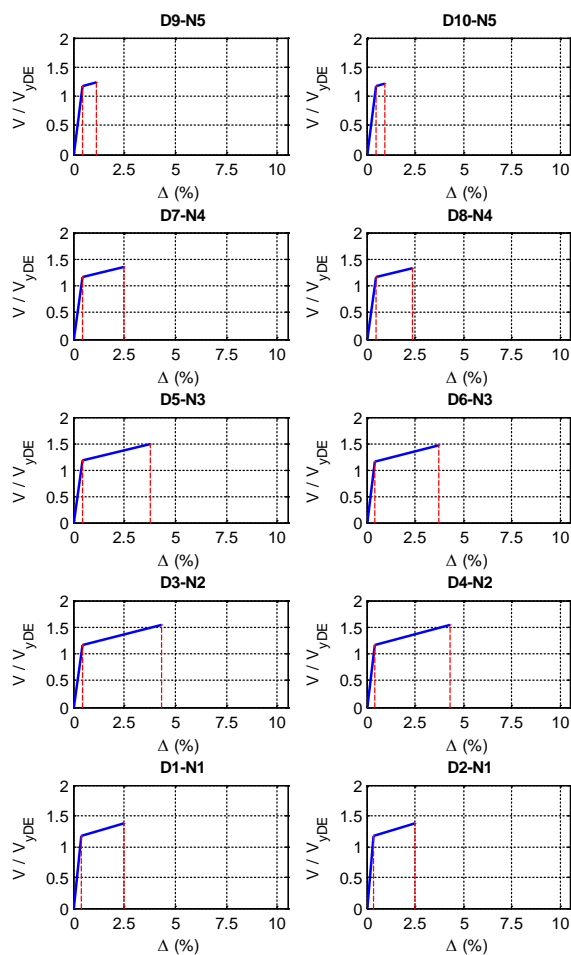
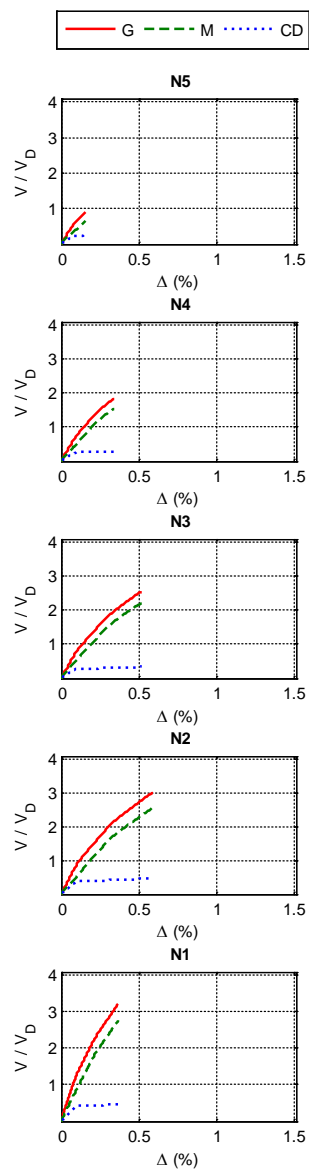
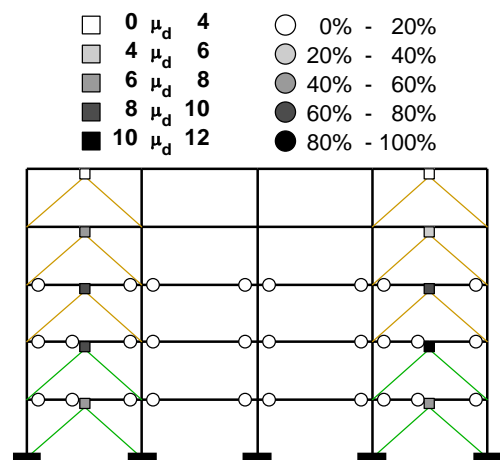
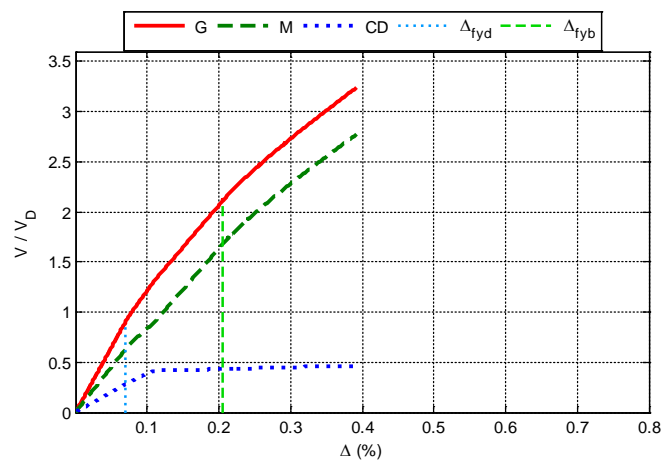


Figura A.5 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

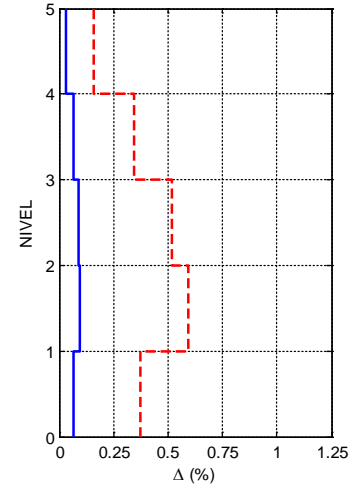
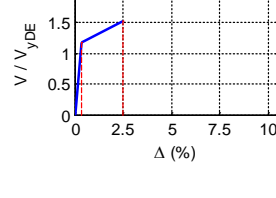
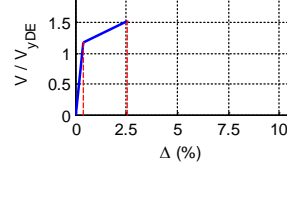
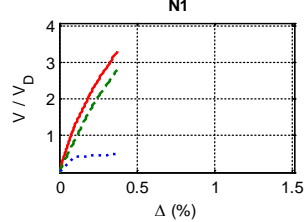
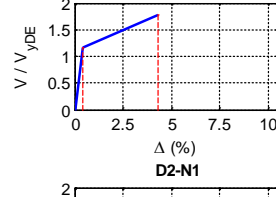
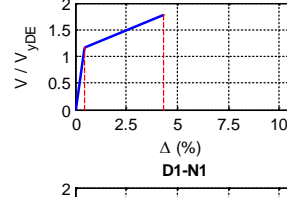
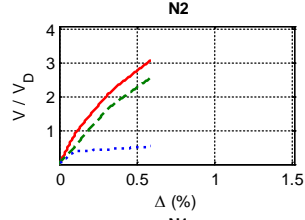
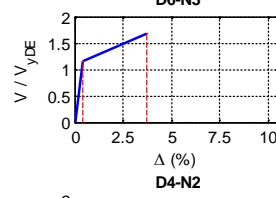
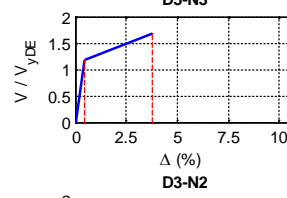
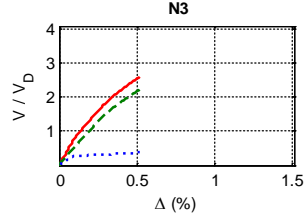
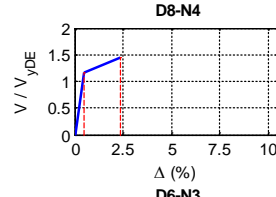
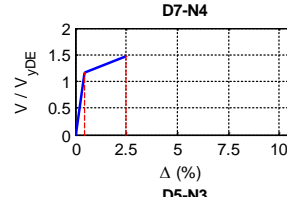
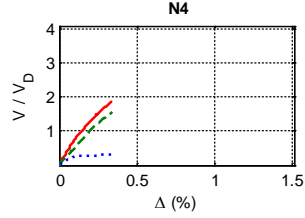
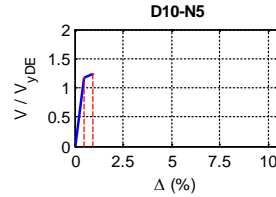
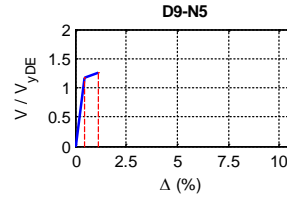
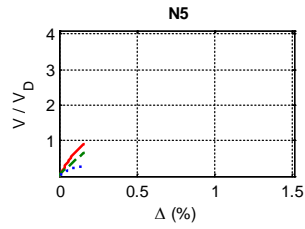
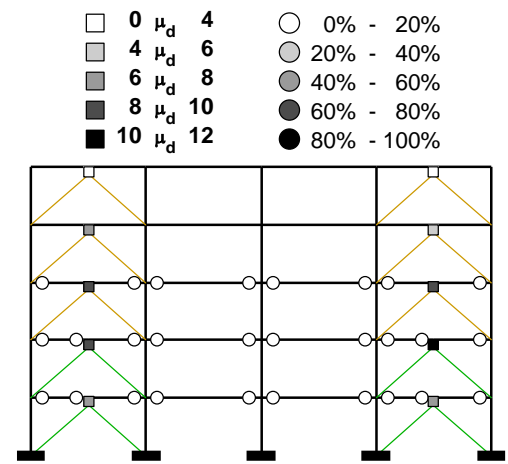
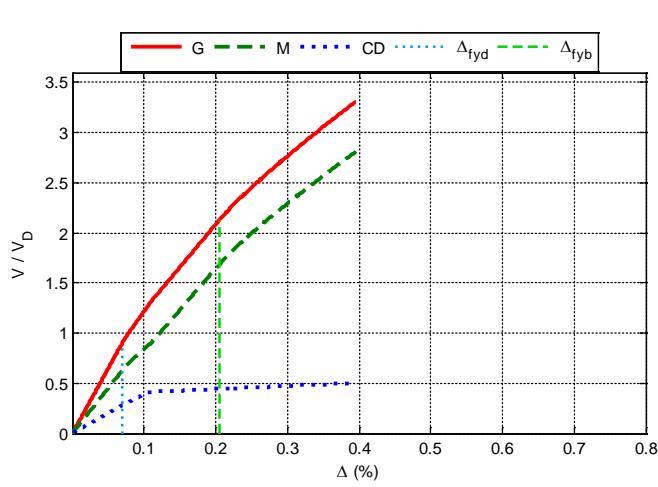


Figura A.6 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

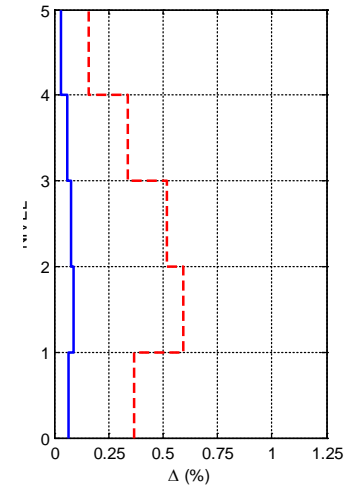
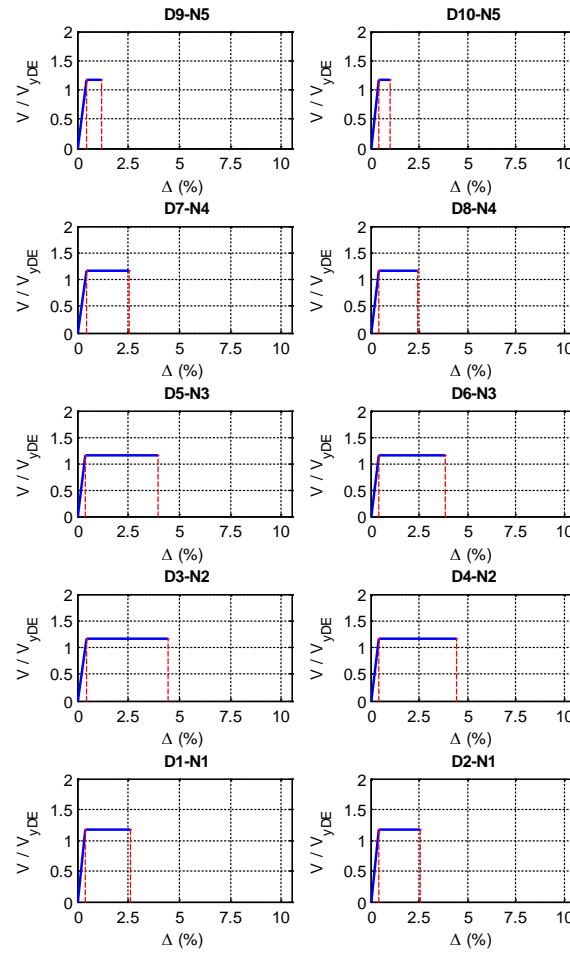
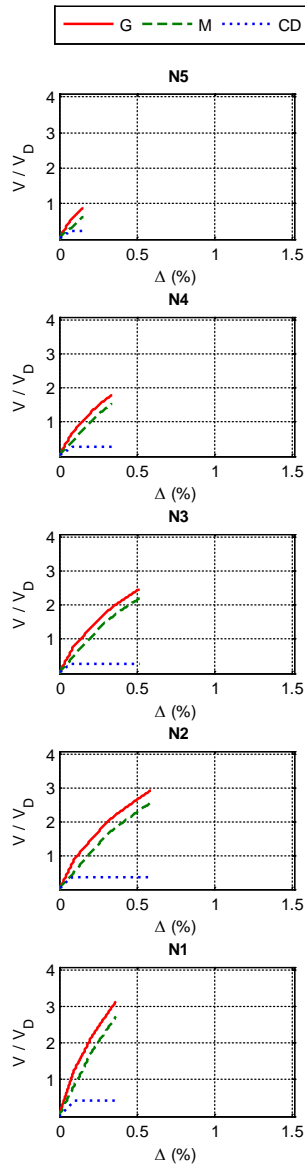
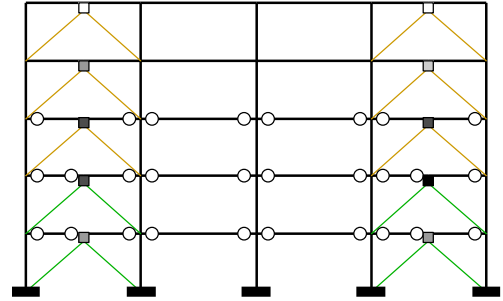
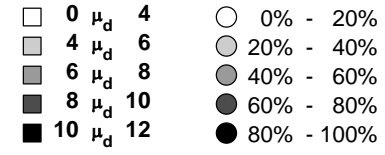
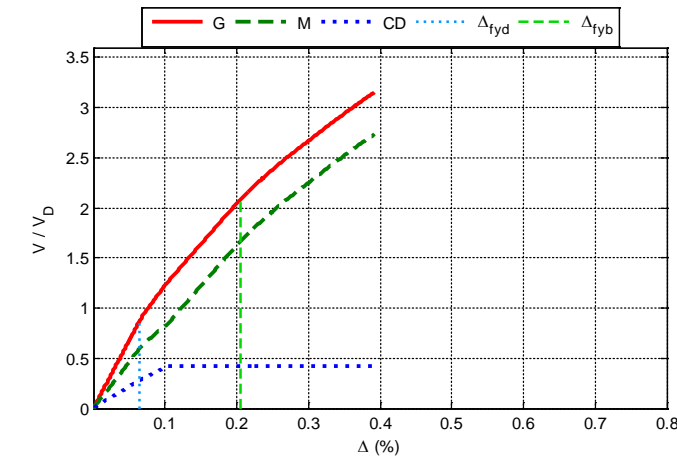


Figura A.7 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

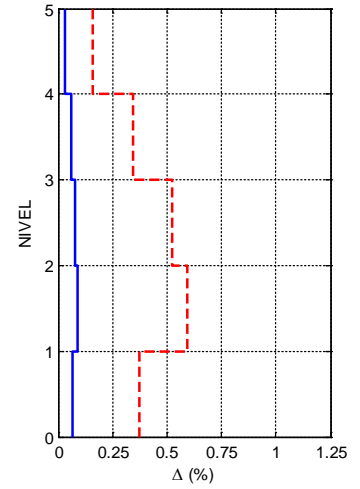
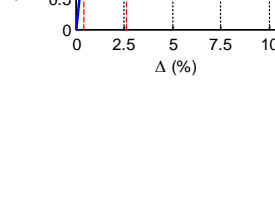
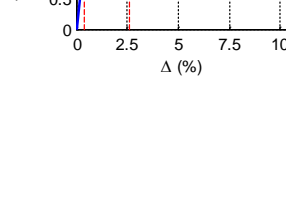
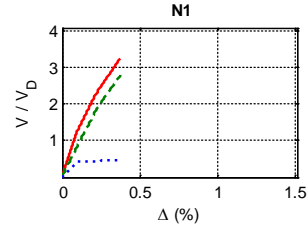
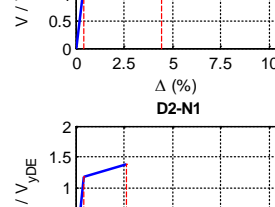
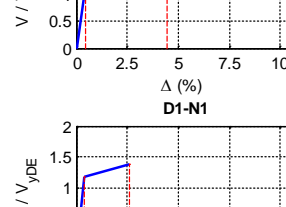
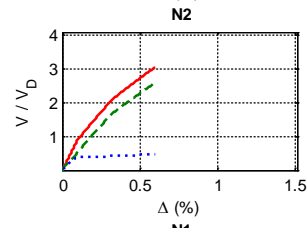
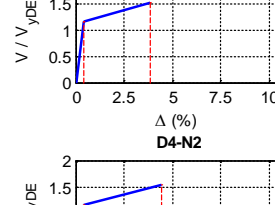
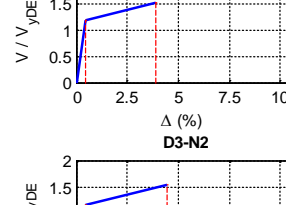
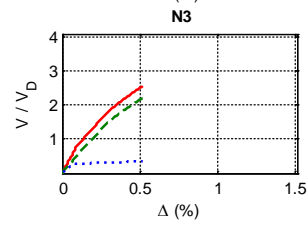
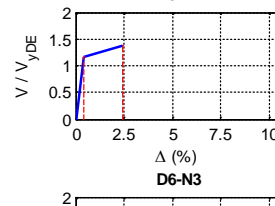
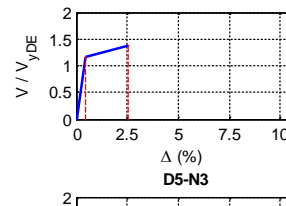
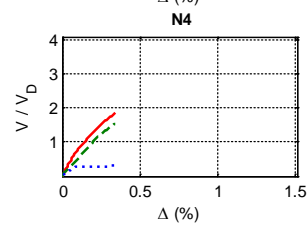
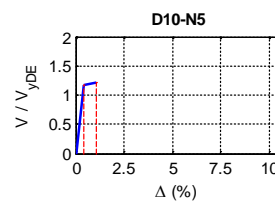
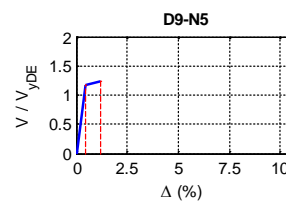
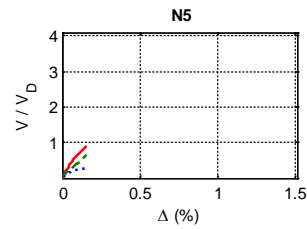
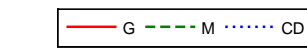
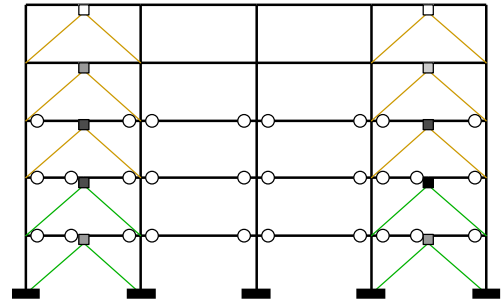
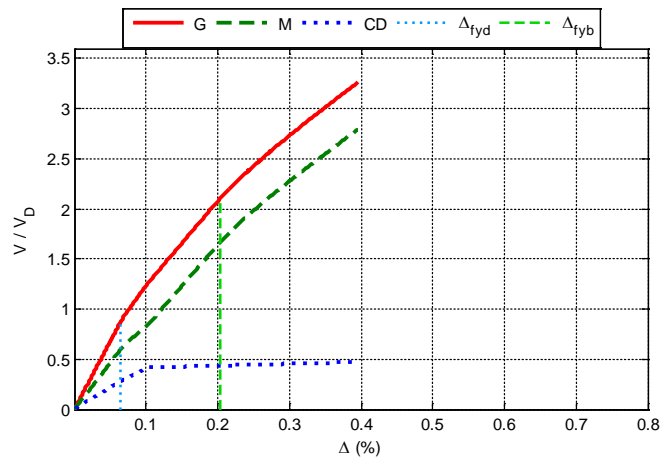


Figura A.8 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

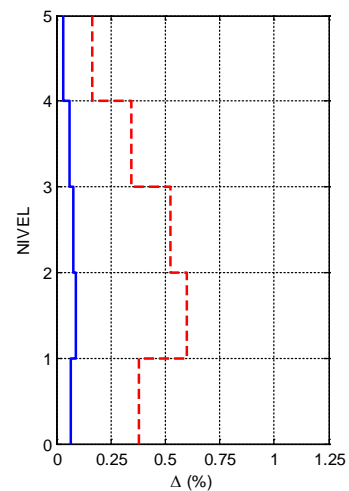
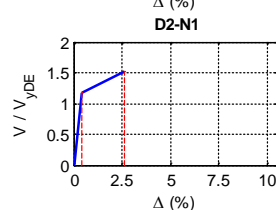
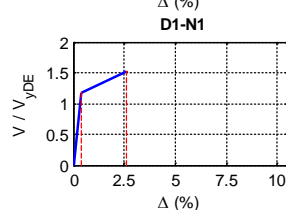
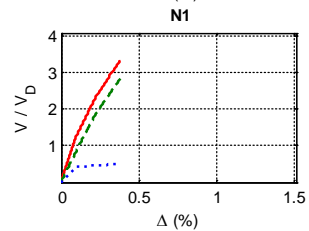
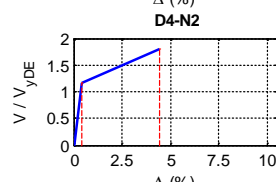
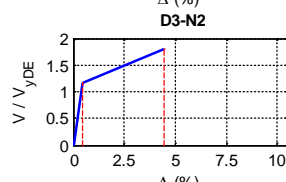
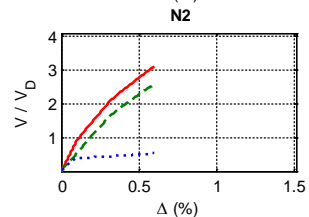
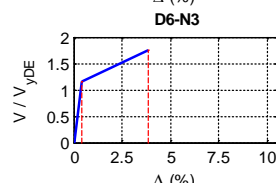
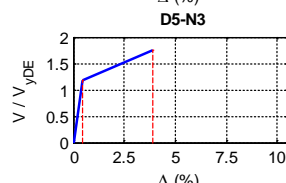
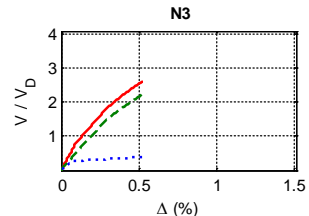
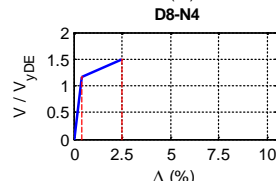
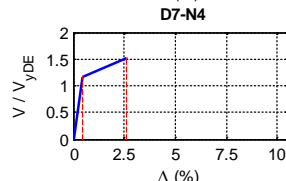
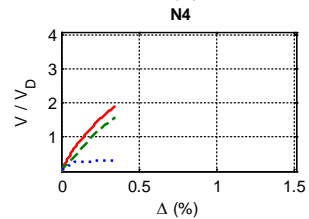
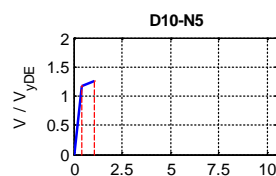
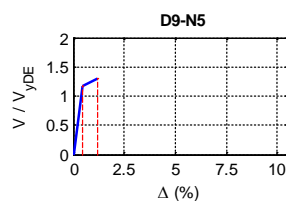
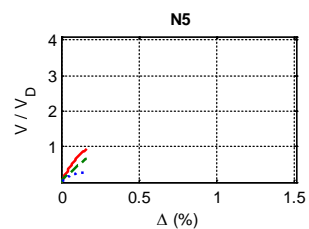
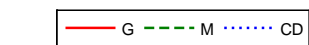
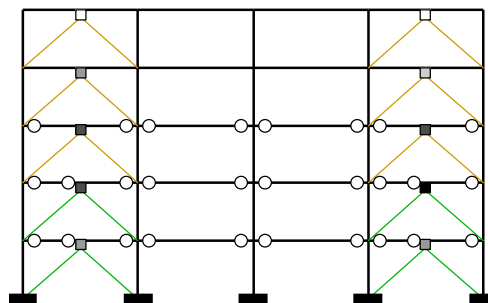
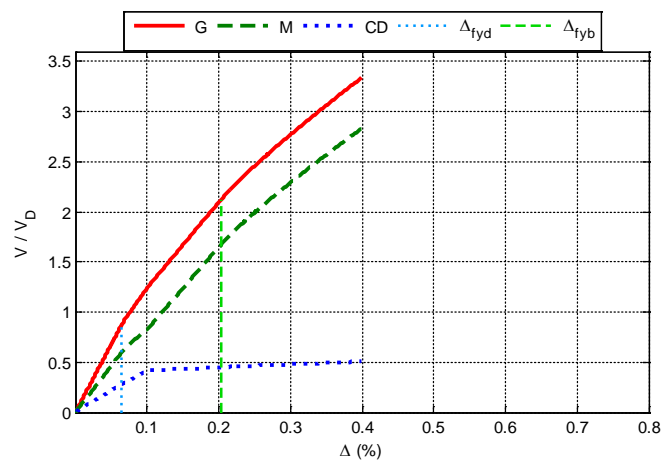


Figura A.9 $N = 5, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

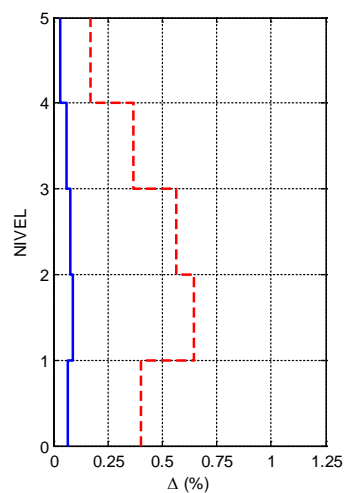
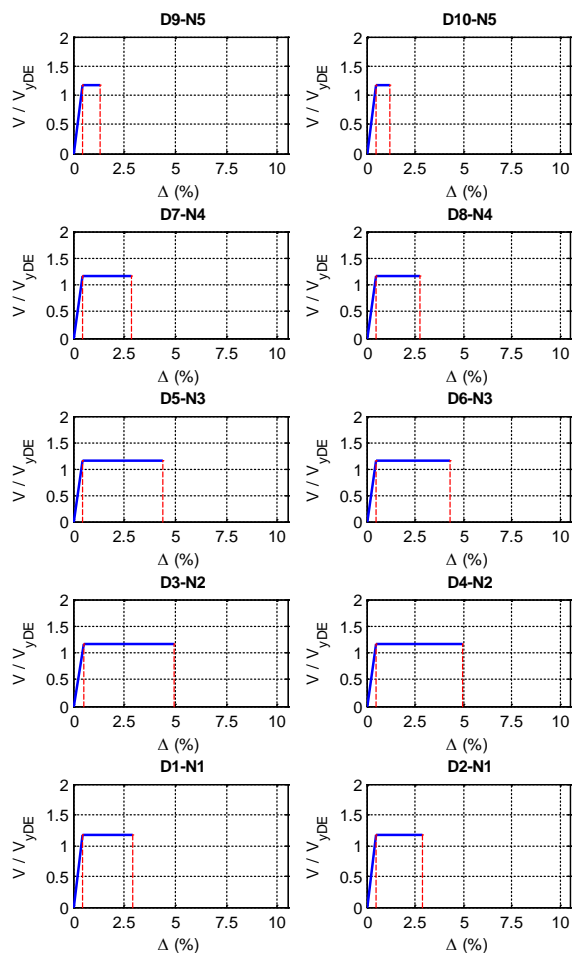
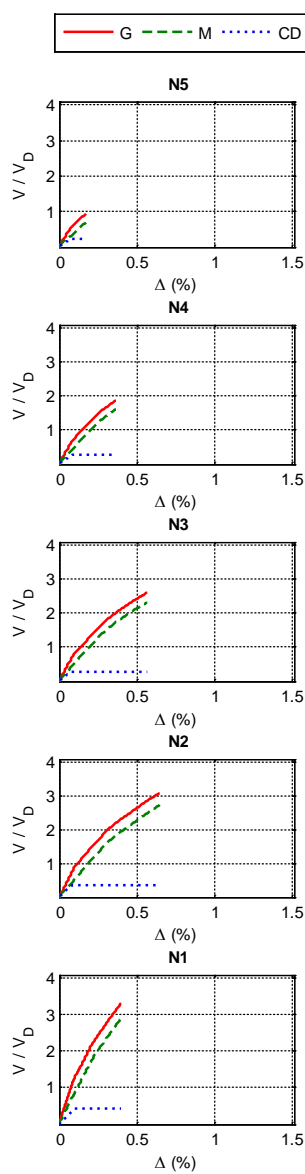
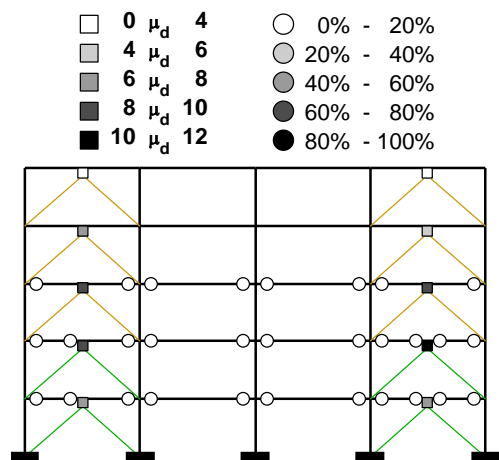
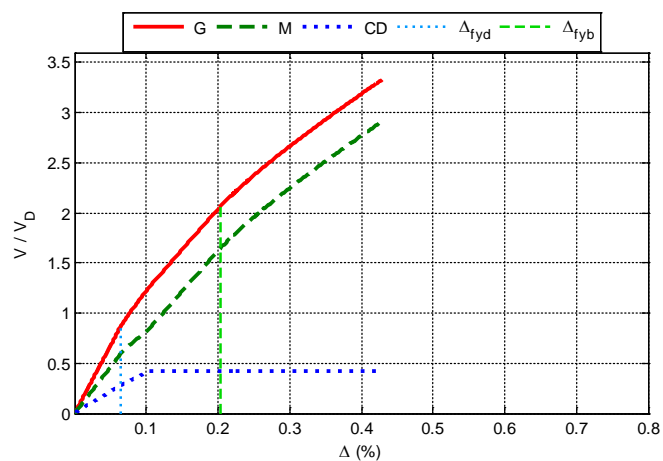


Figura A.10 $N = 5$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

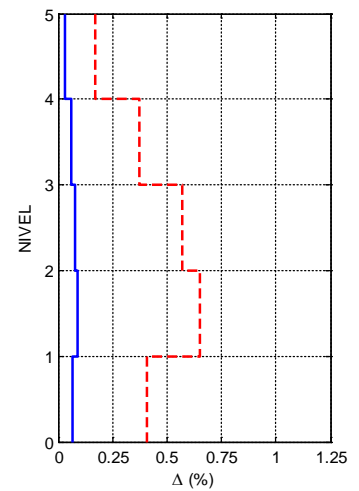
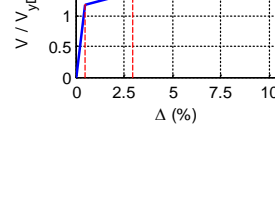
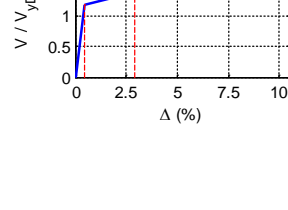
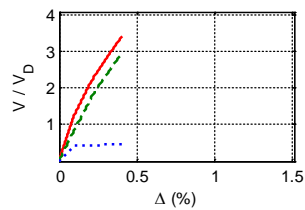
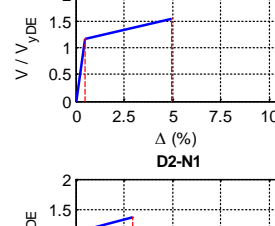
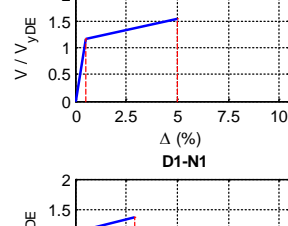
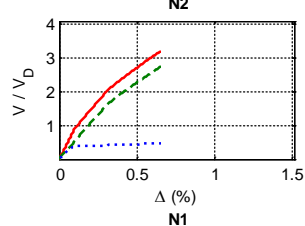
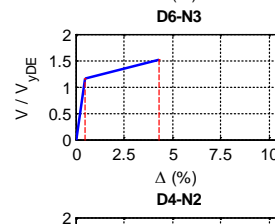
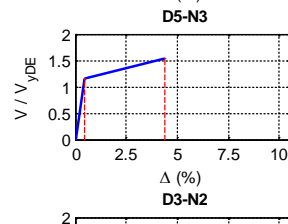
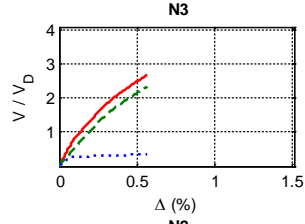
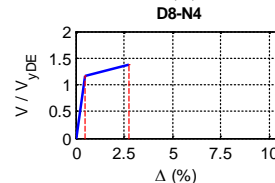
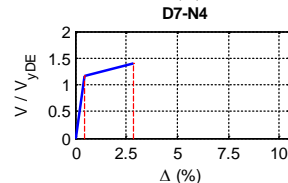
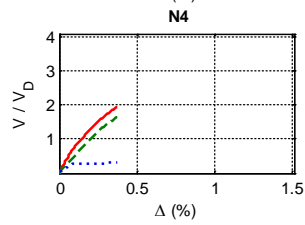
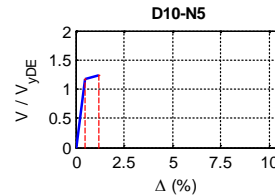
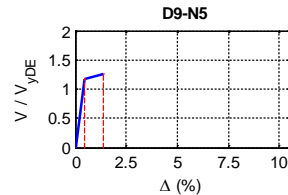
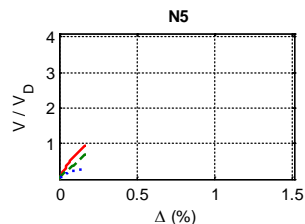
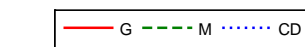
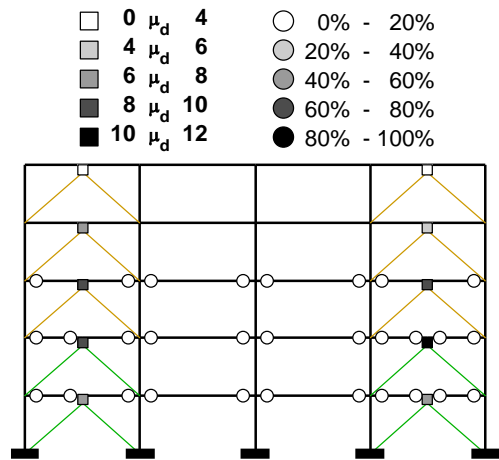
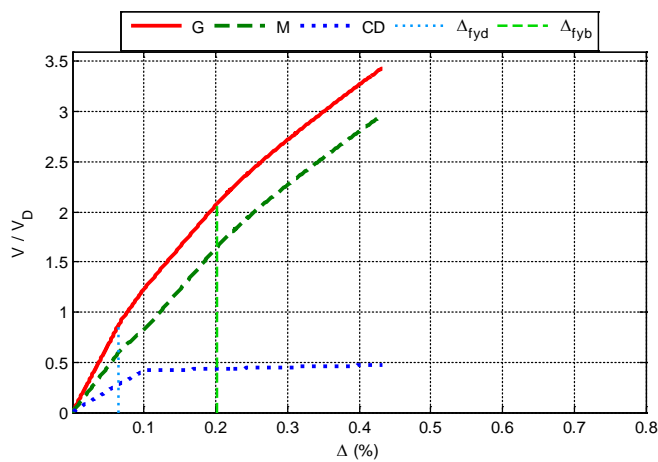


Figura A.11 $N = 5$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

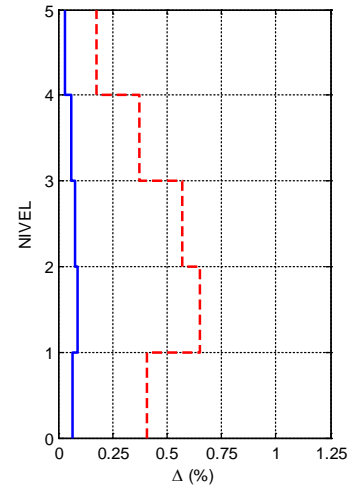
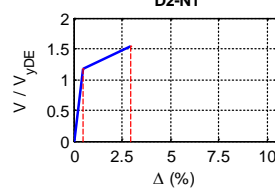
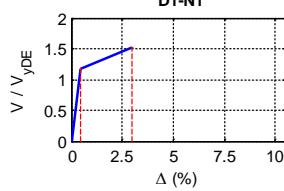
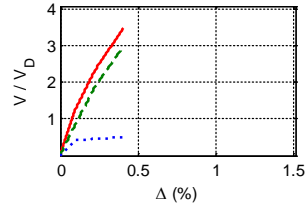
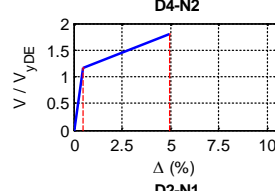
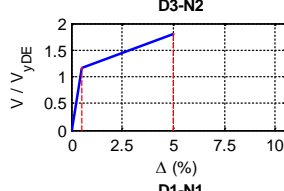
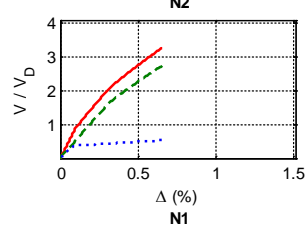
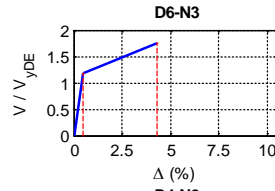
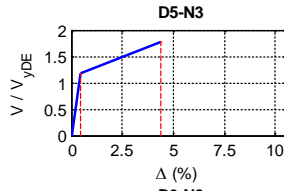
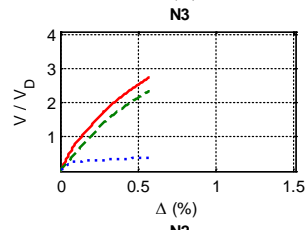
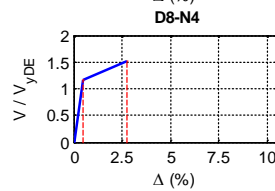
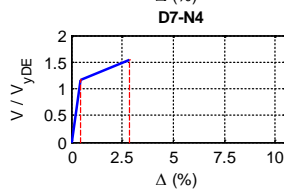
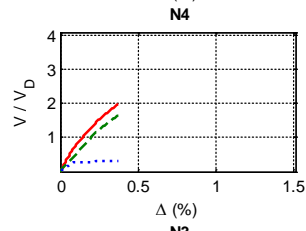
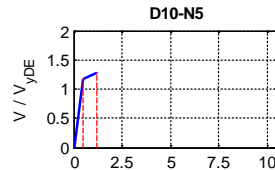
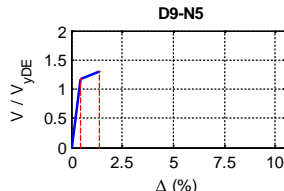
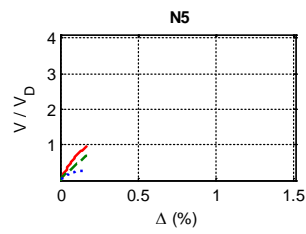
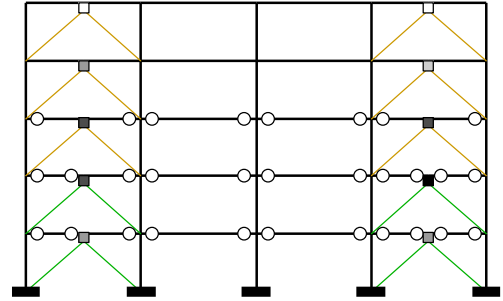
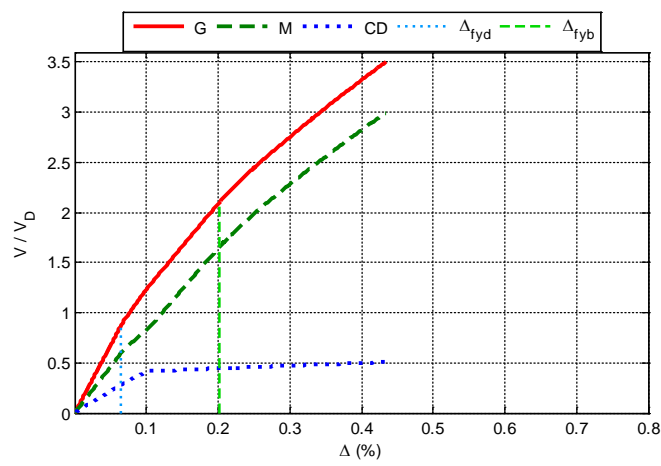


Figura A.12 $N = 5$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

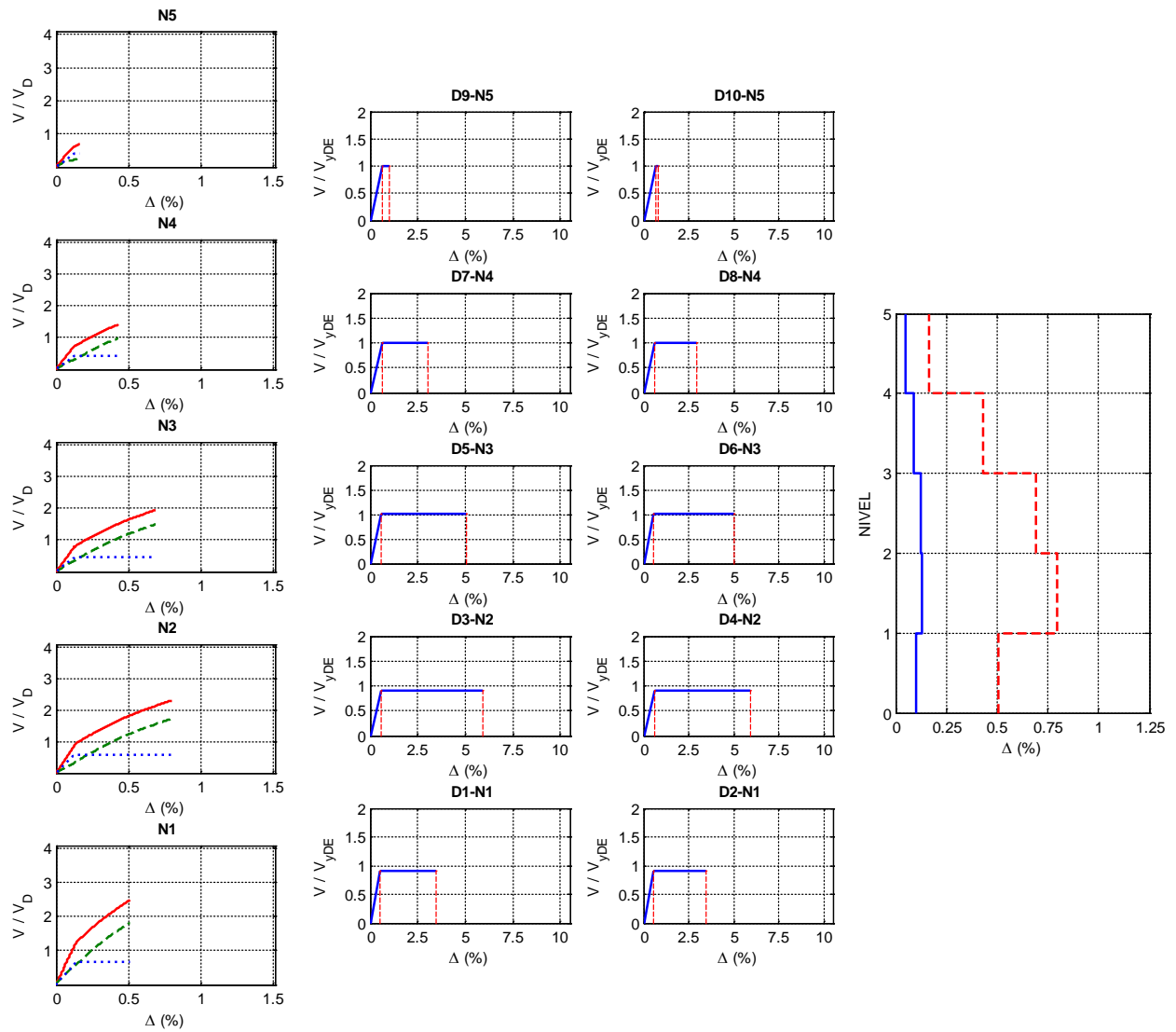
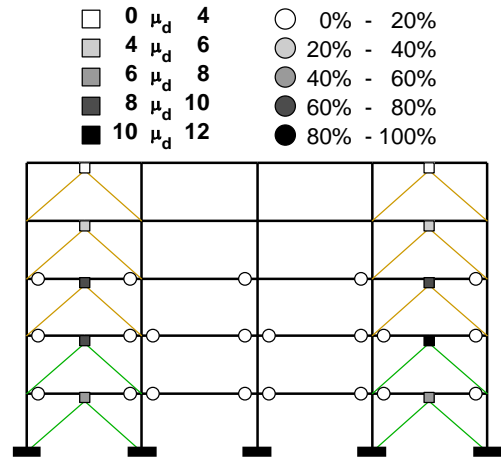
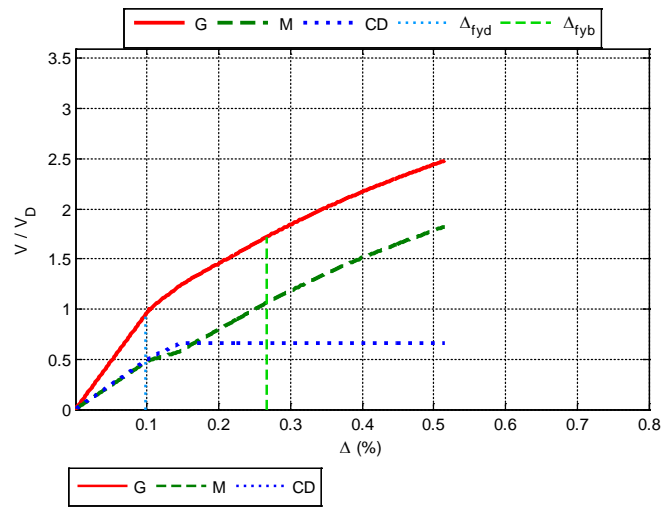


Figura A.13 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

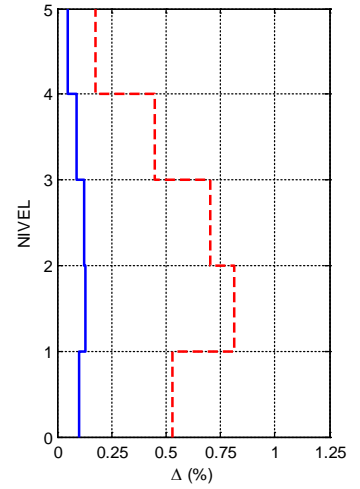
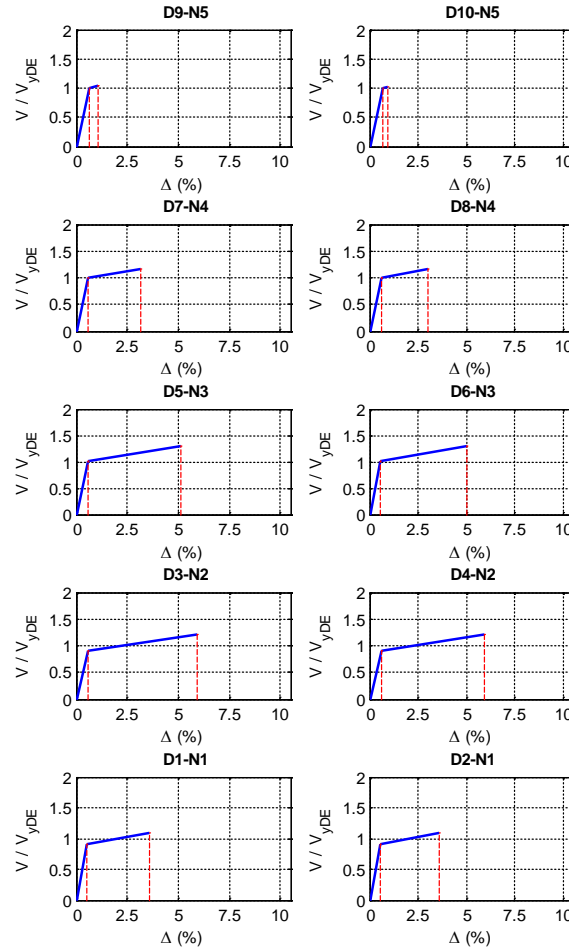
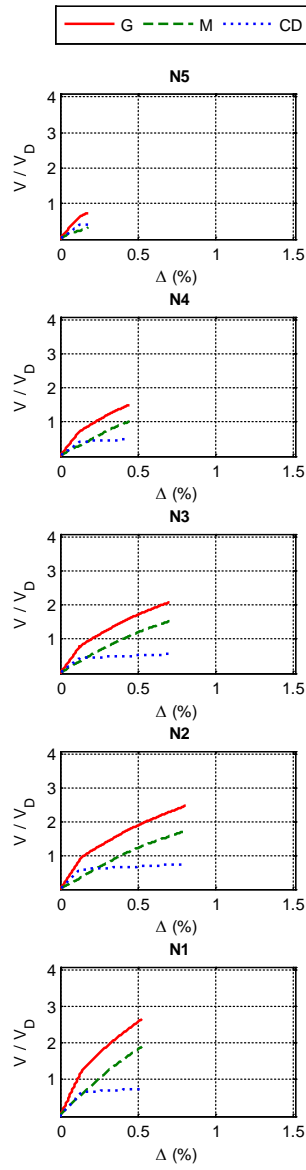
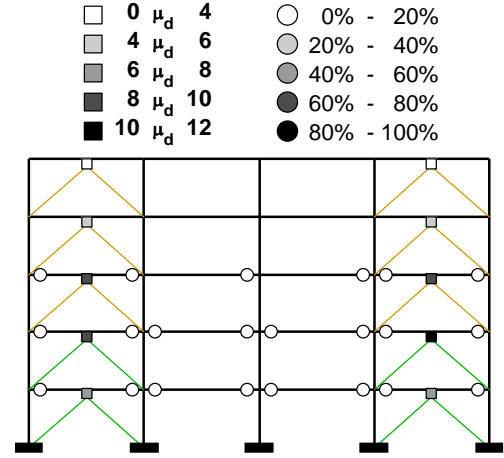
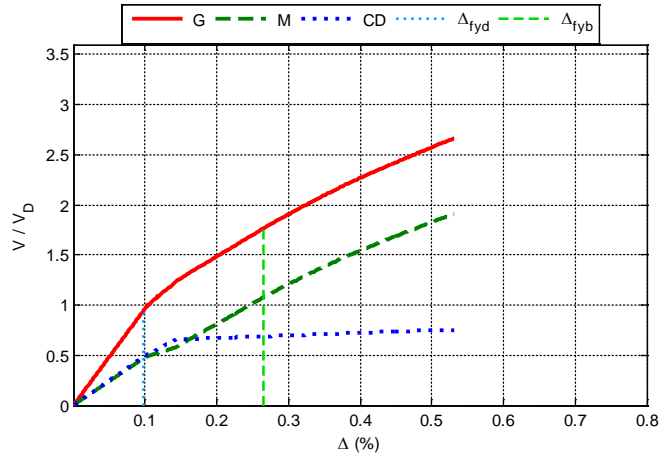


Figura A.14 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

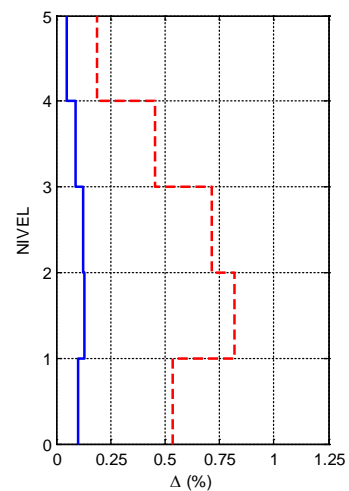
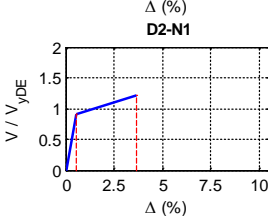
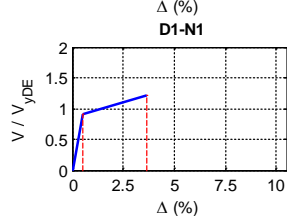
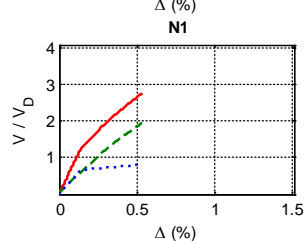
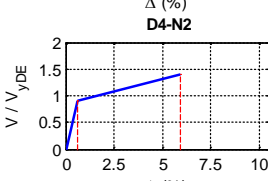
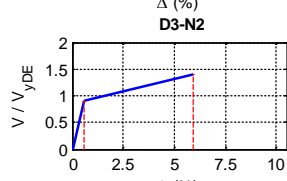
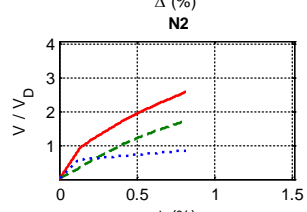
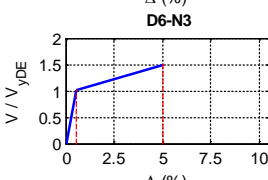
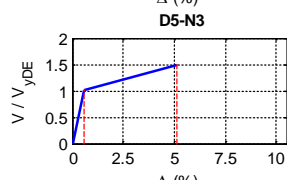
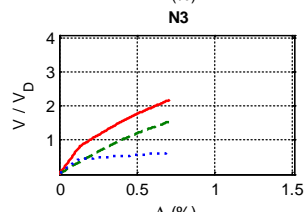
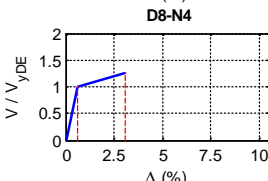
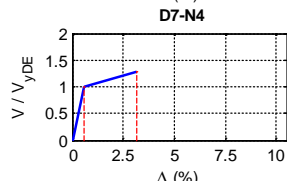
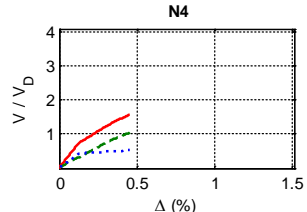
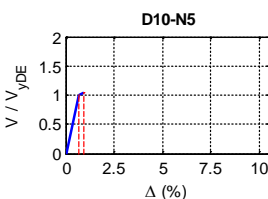
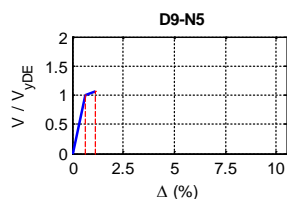
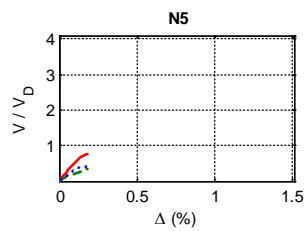
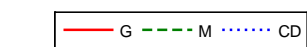
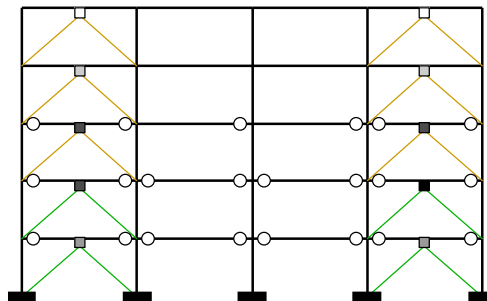
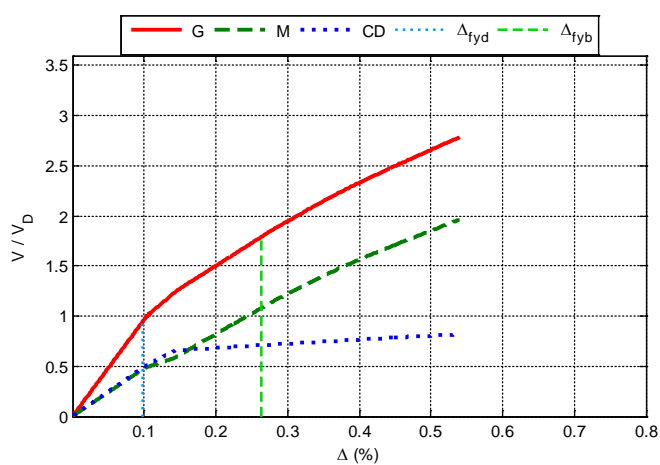


Figura A.15 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

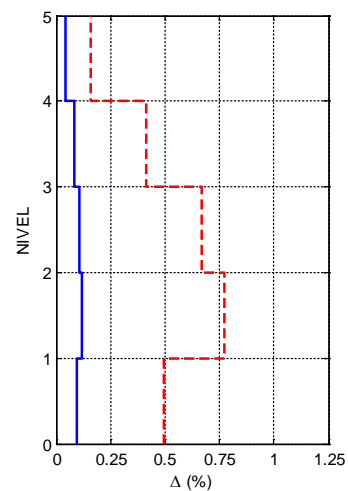
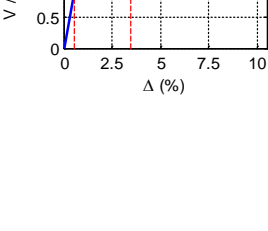
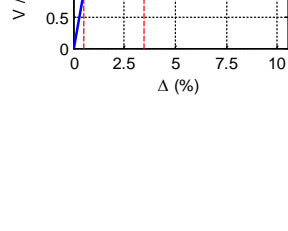
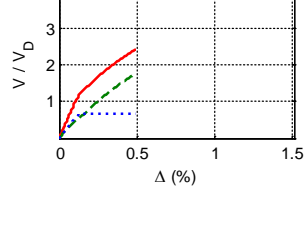
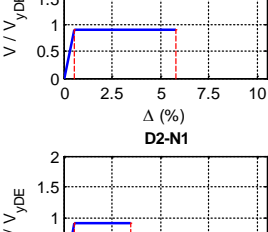
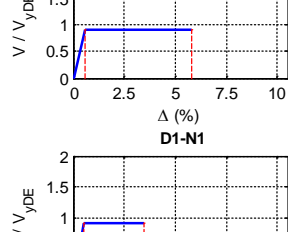
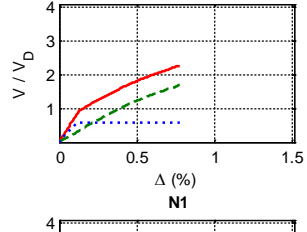
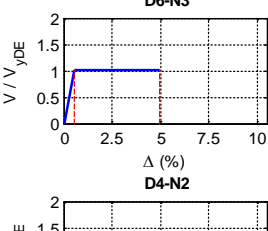
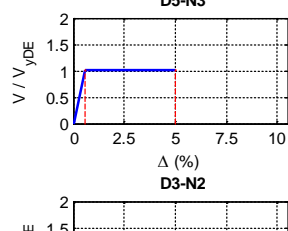
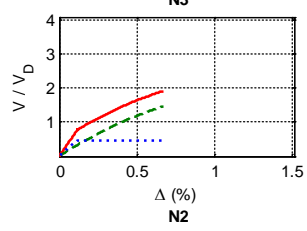
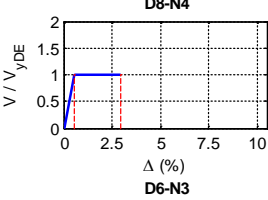
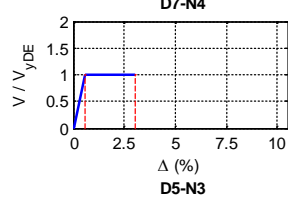
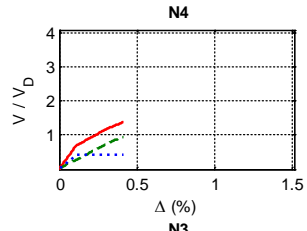
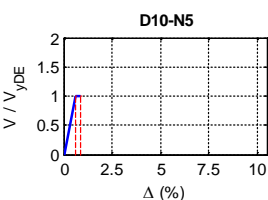
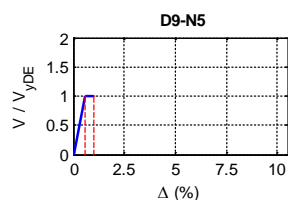
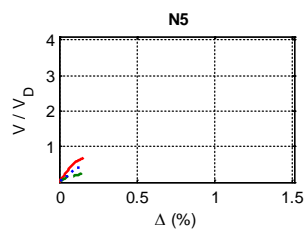
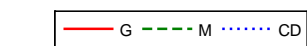
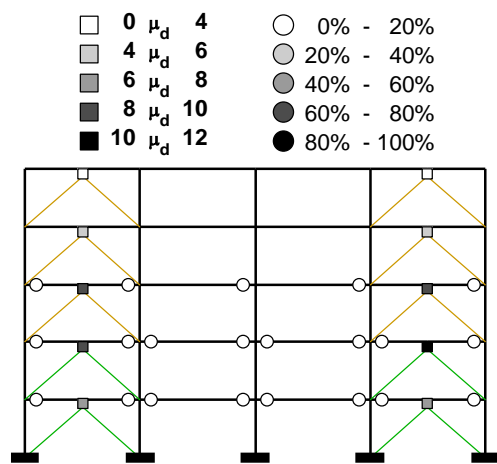
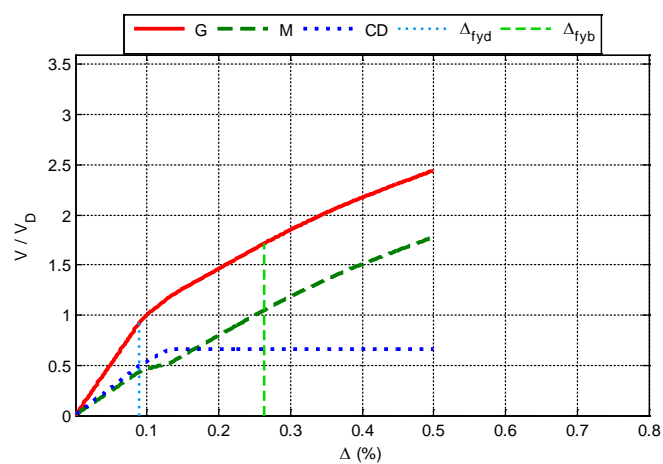


Figura A.16 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

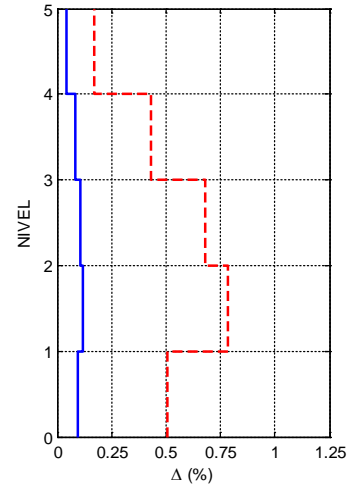
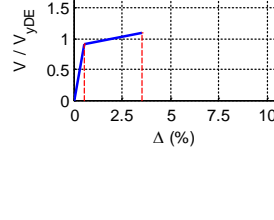
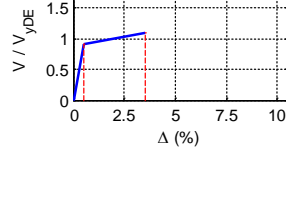
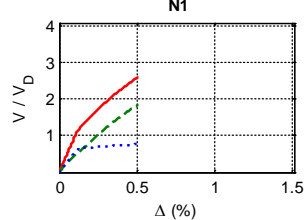
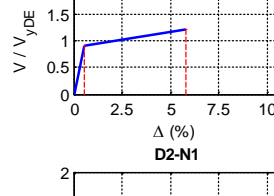
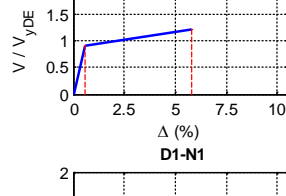
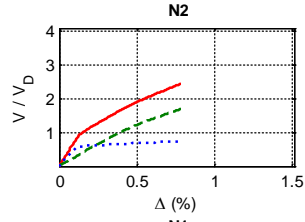
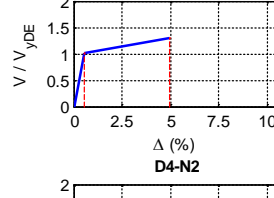
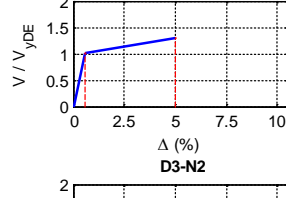
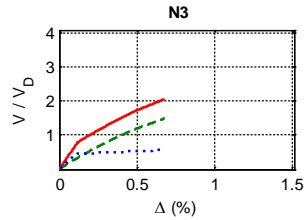
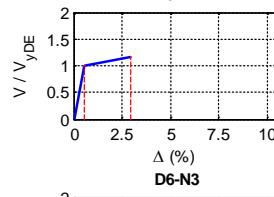
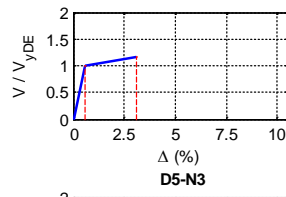
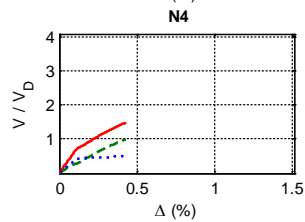
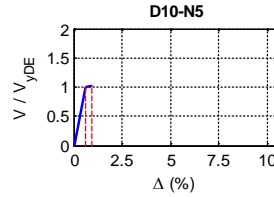
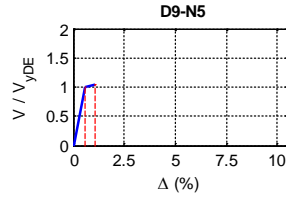
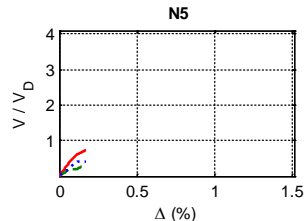
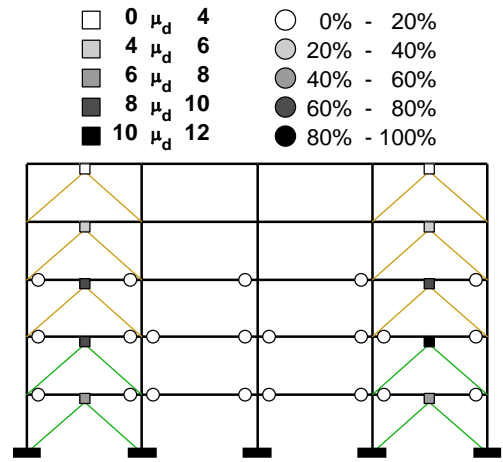
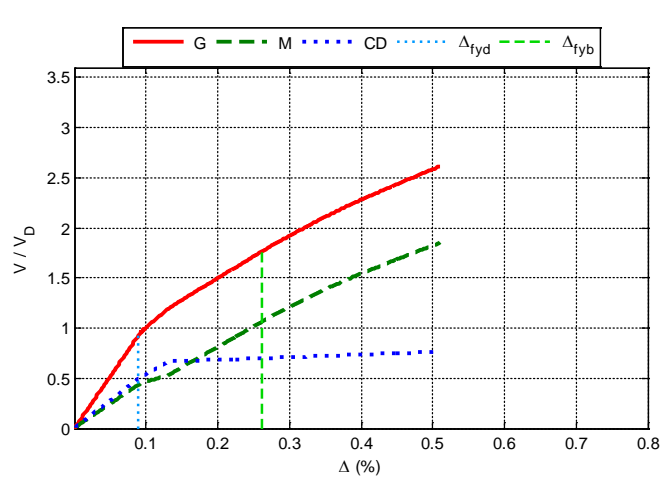


Figura A.17 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

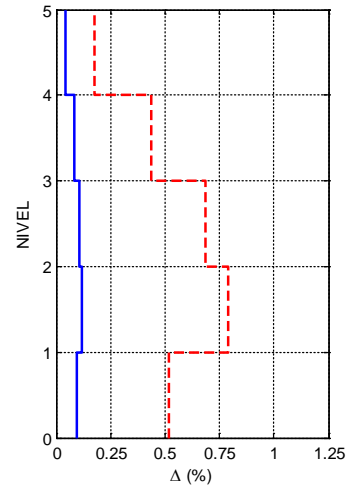
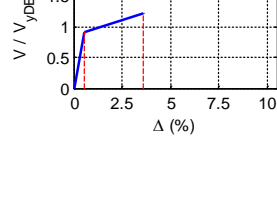
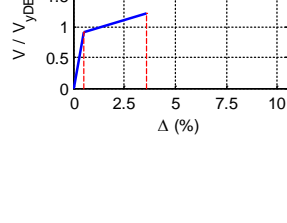
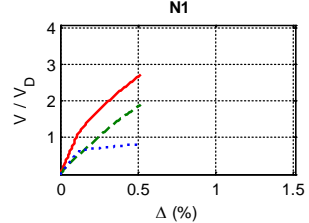
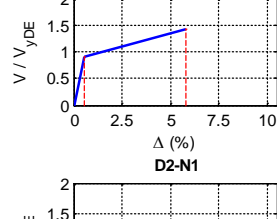
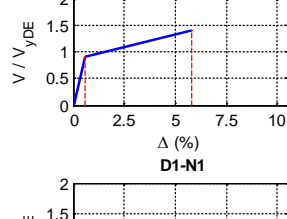
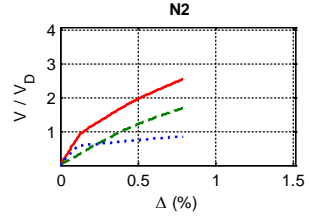
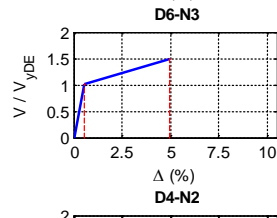
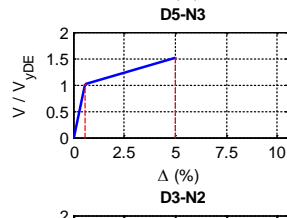
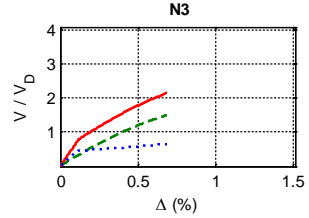
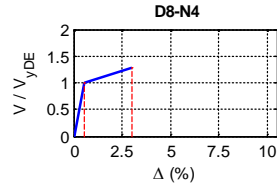
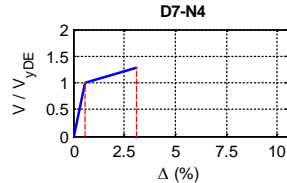
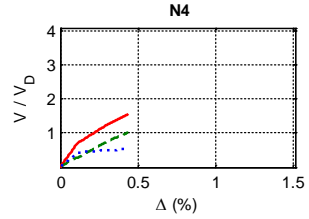
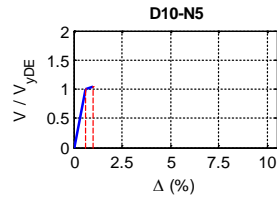
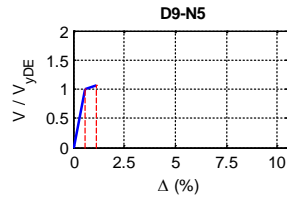
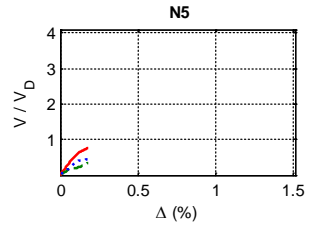
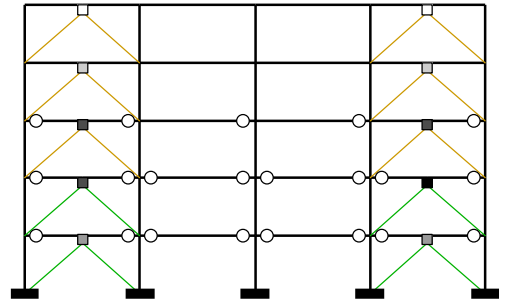
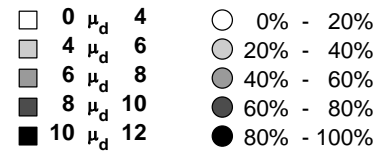
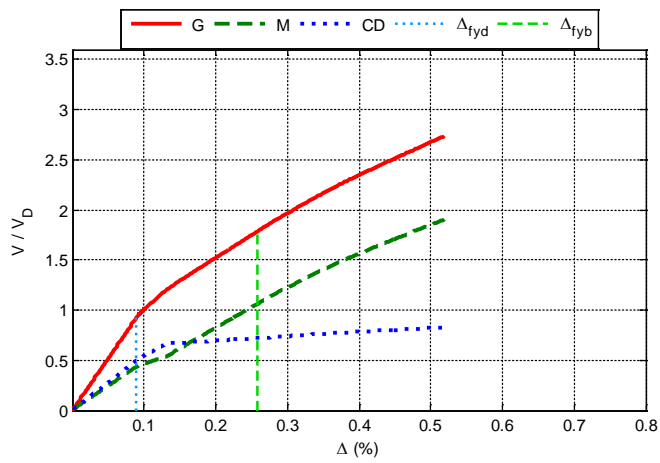


Figura A.18 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

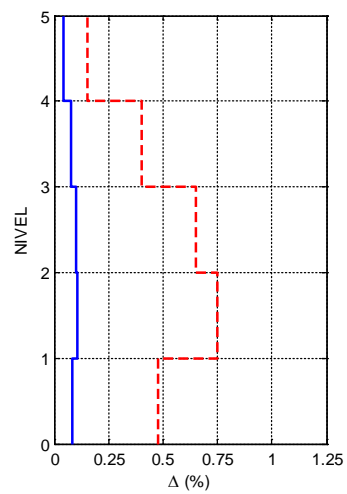
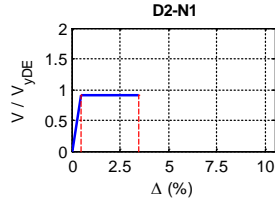
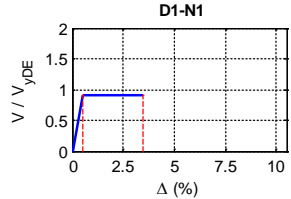
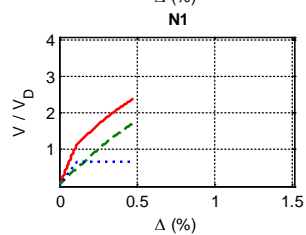
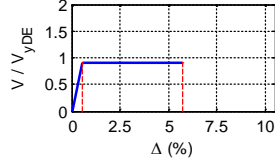
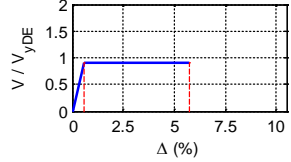
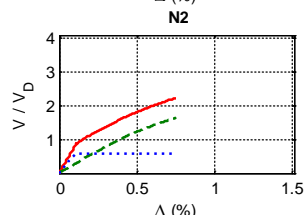
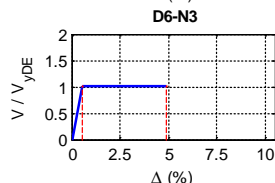
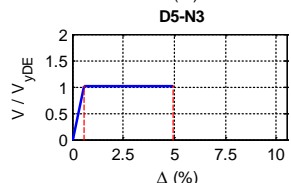
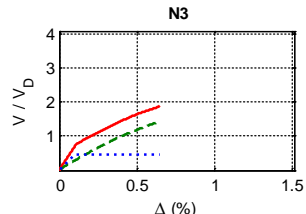
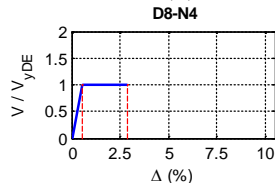
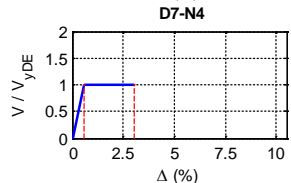
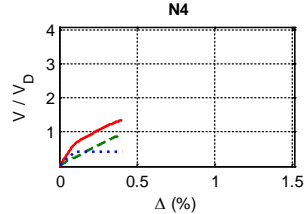
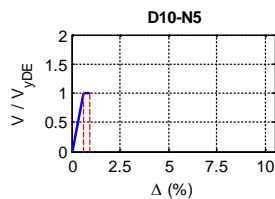
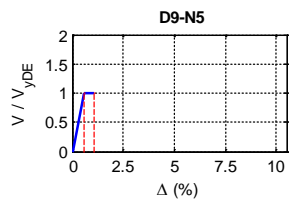
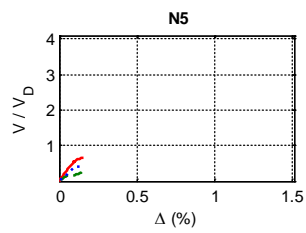
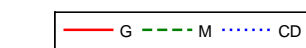
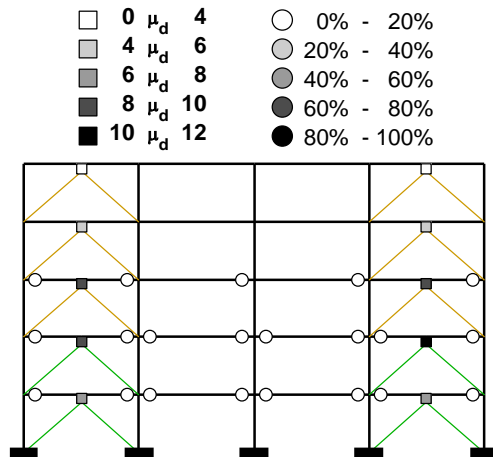
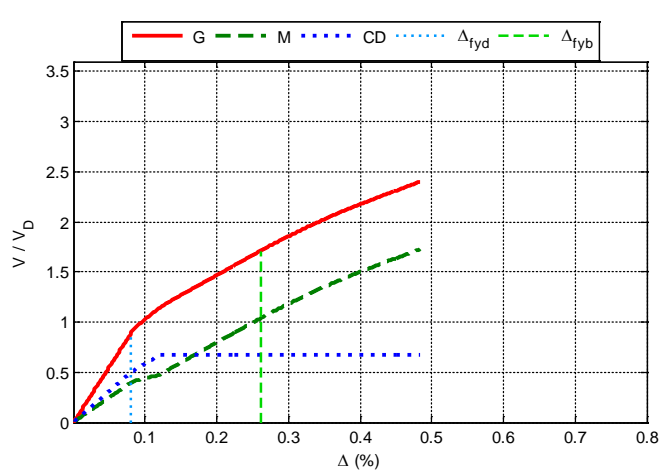


Figura A.19 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

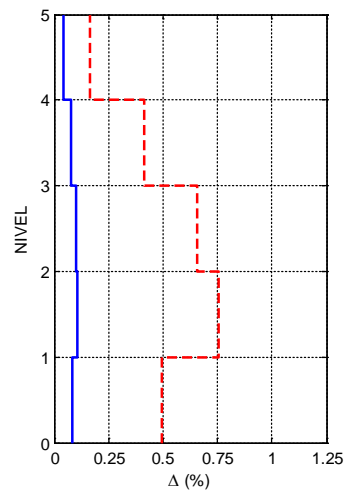
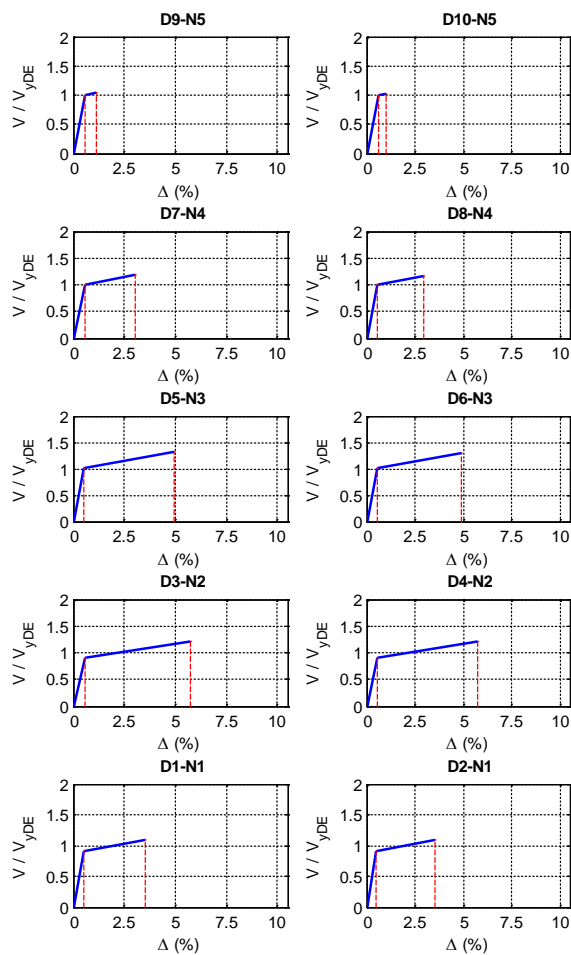
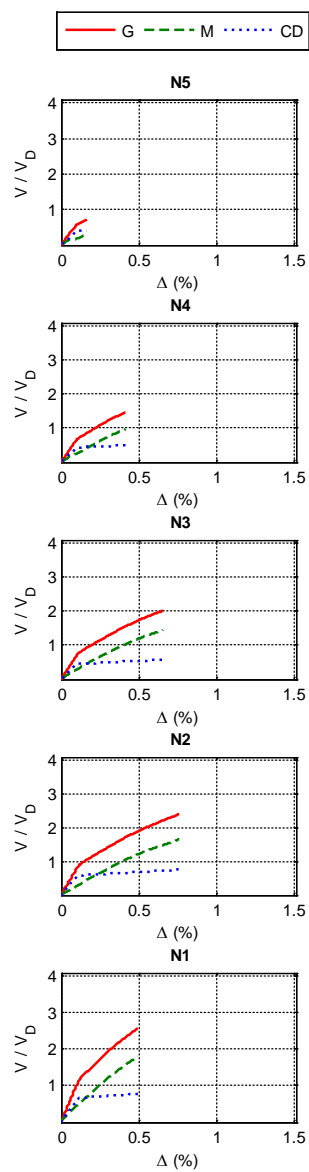
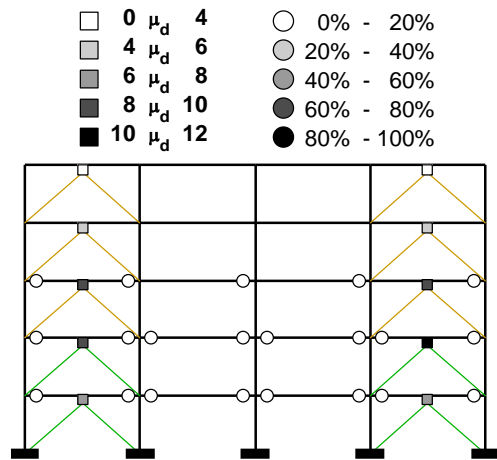
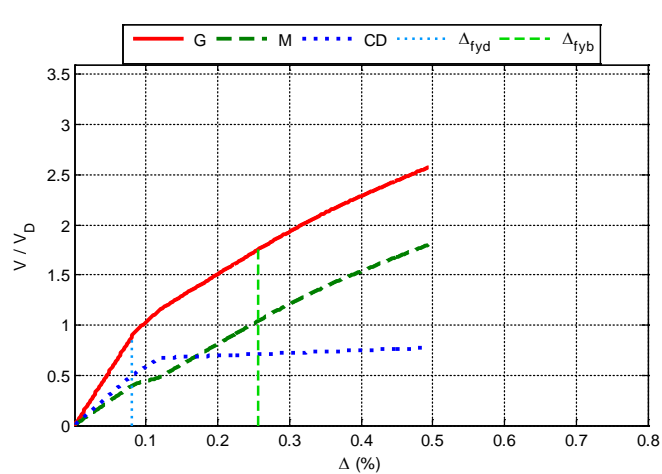


Figura A.20 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

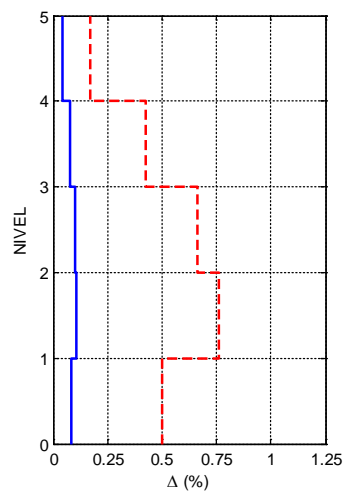
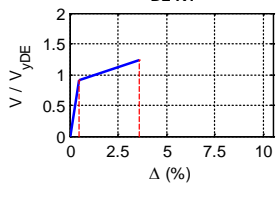
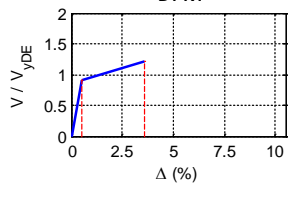
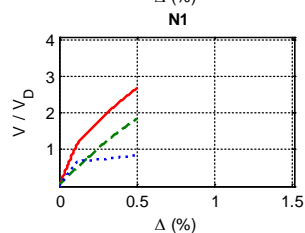
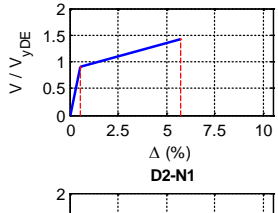
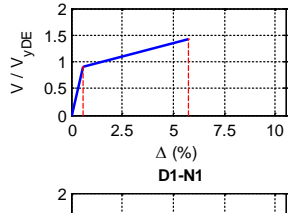
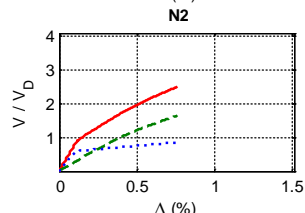
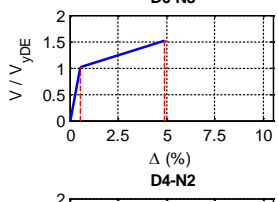
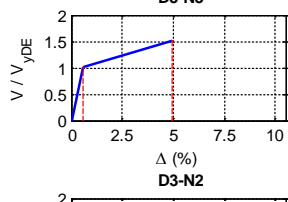
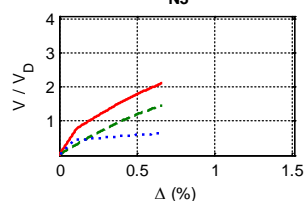
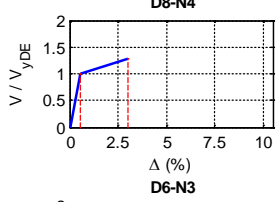
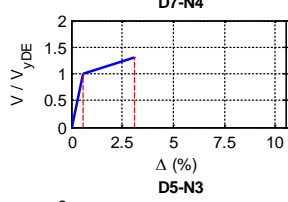
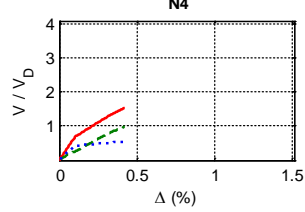
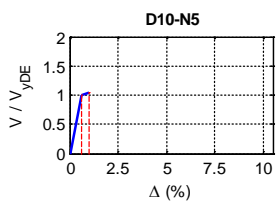
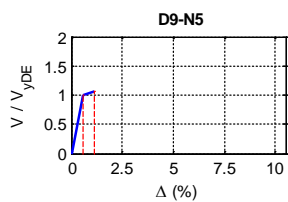
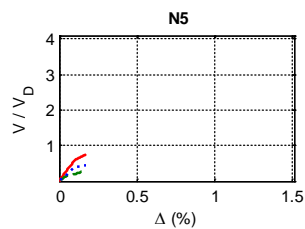
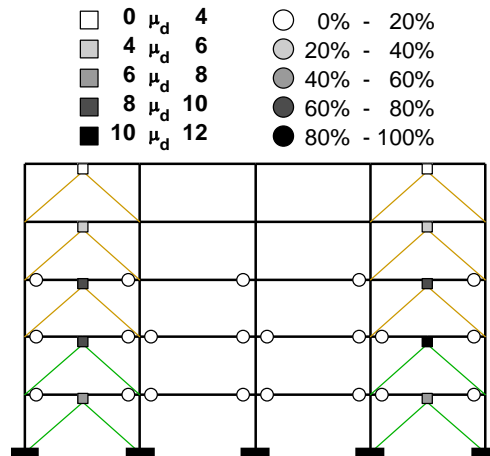
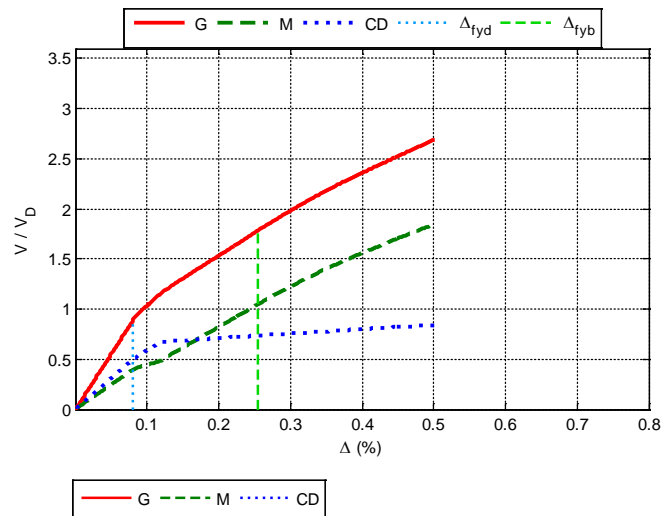


Figura A.21 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

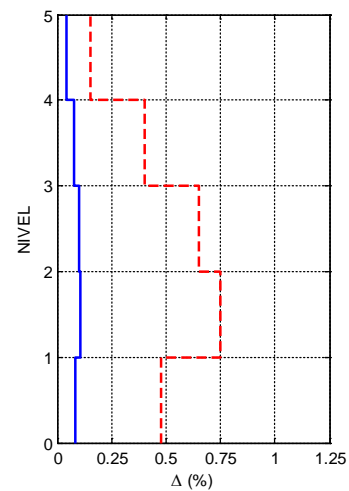
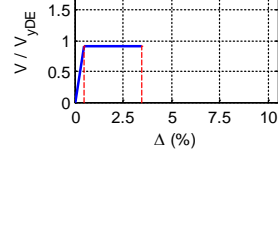
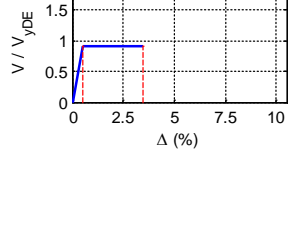
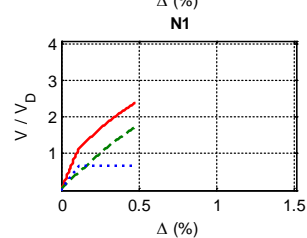
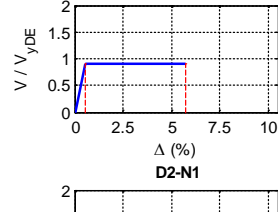
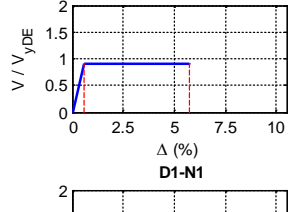
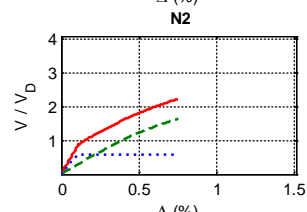
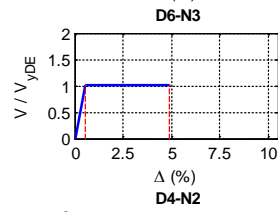
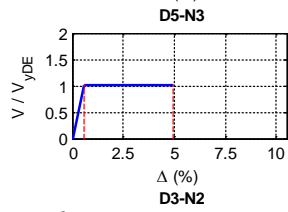
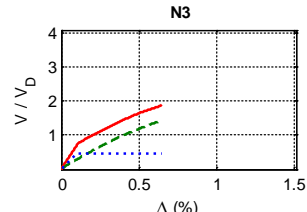
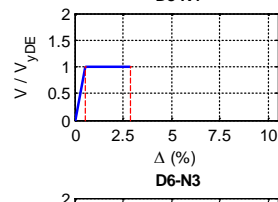
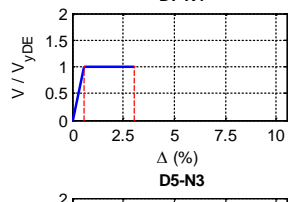
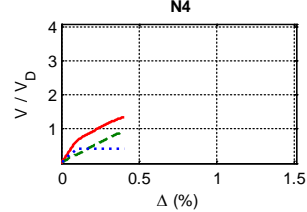
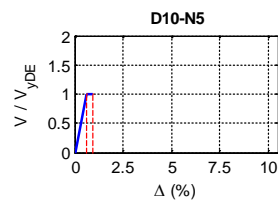
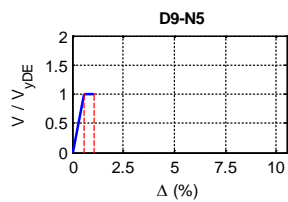
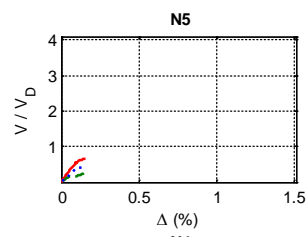
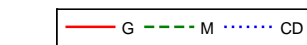
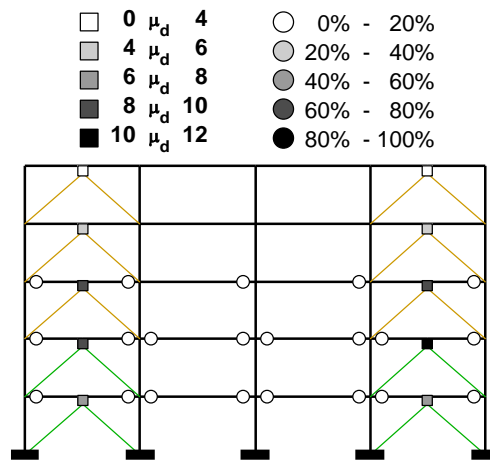
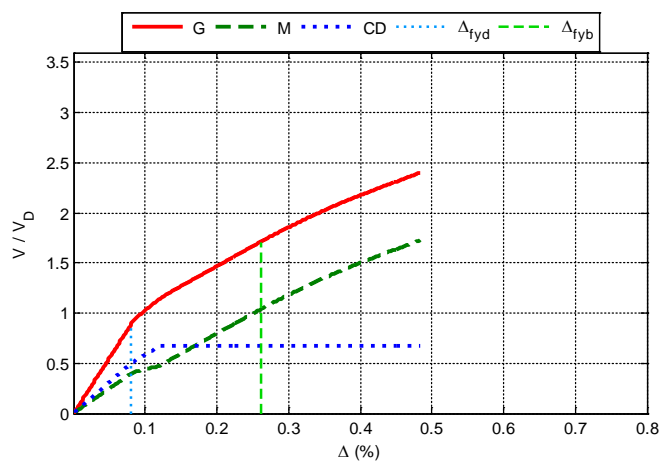


Figura A.22 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

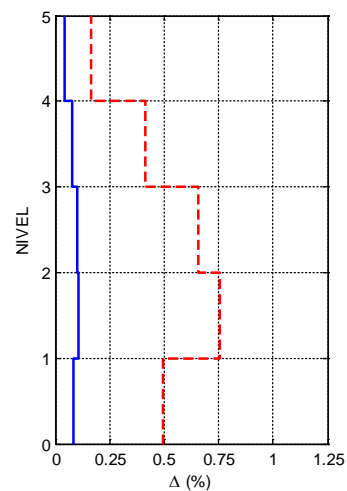
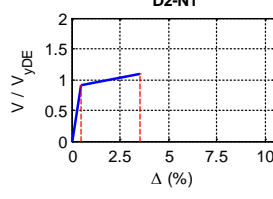
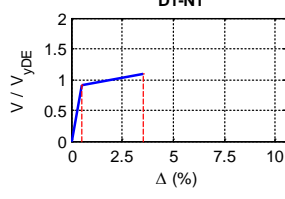
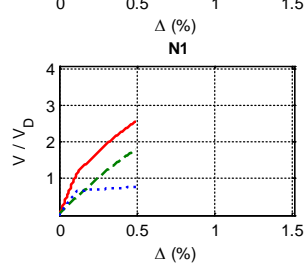
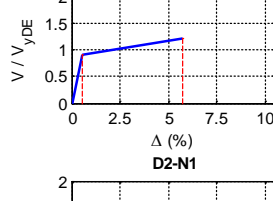
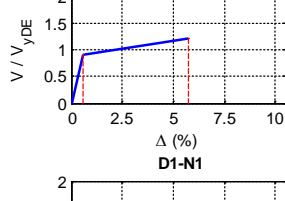
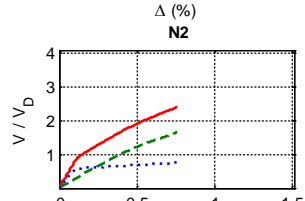
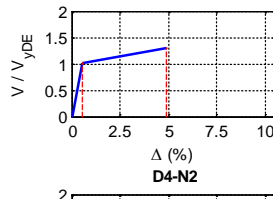
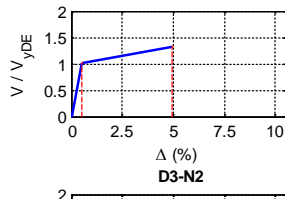
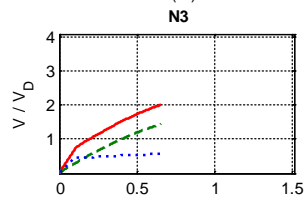
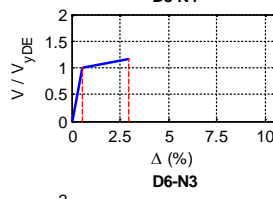
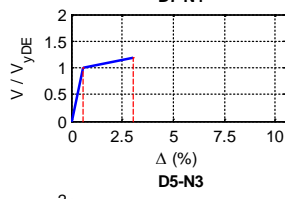
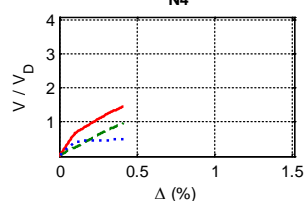
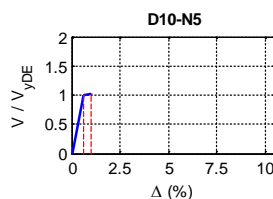
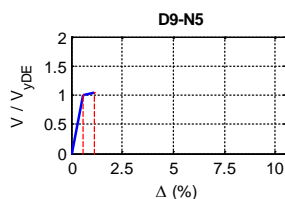
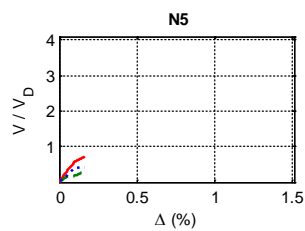
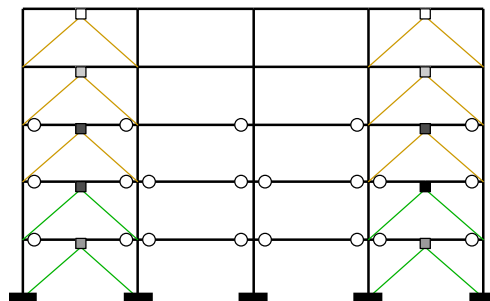
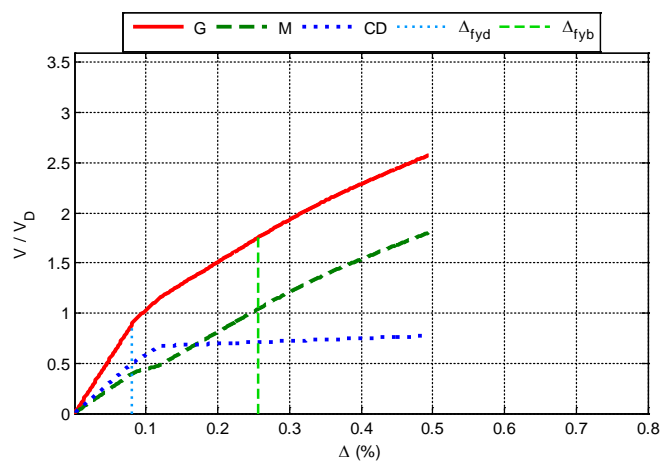


Figura A.23 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

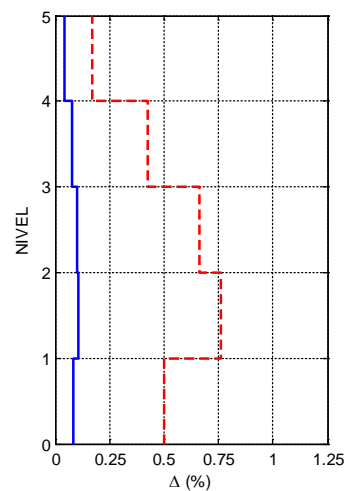
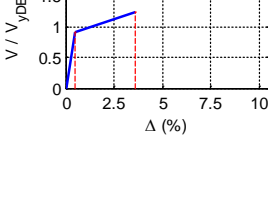
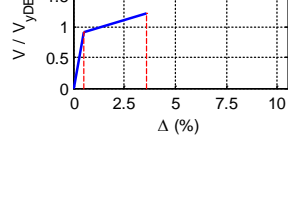
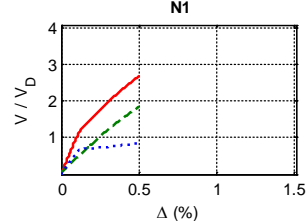
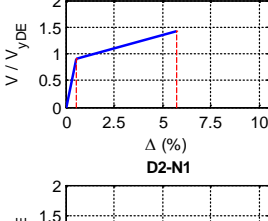
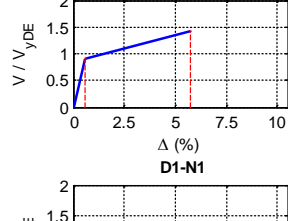
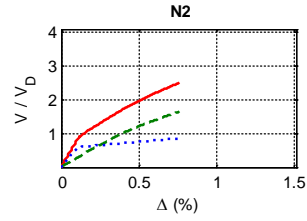
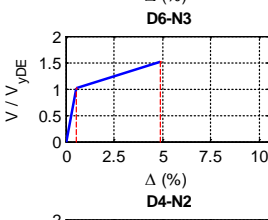
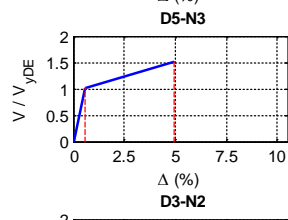
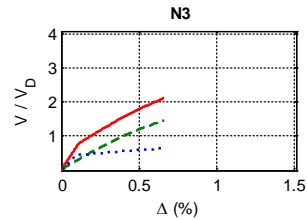
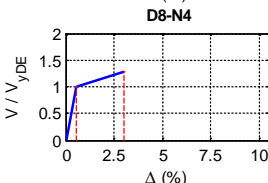
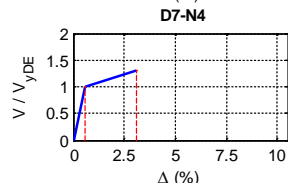
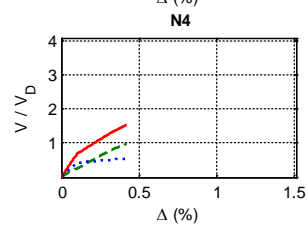
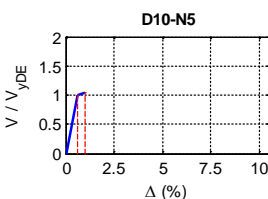
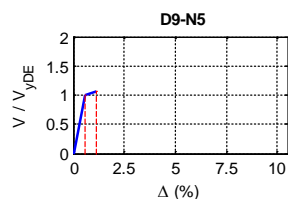
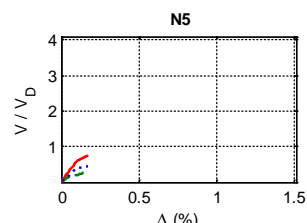
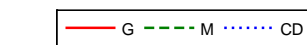
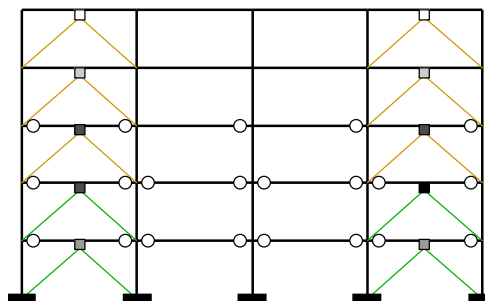
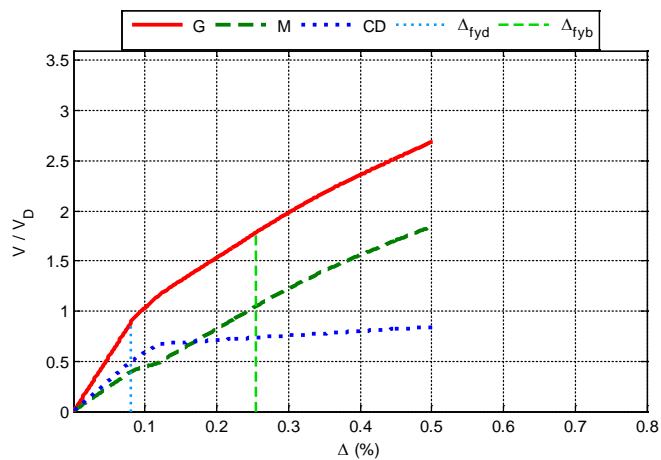


Figura A.24 $N = 5, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

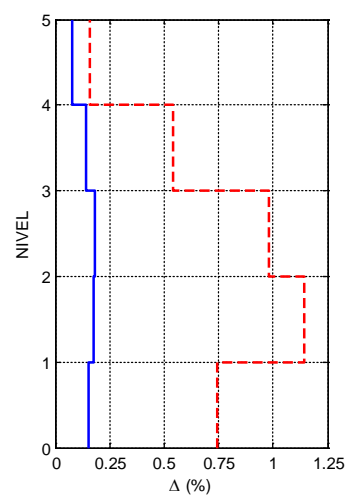
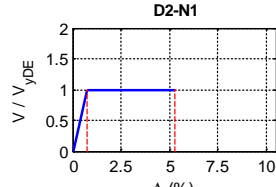
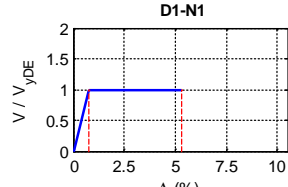
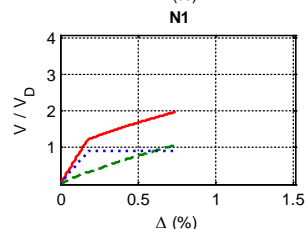
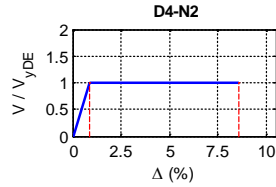
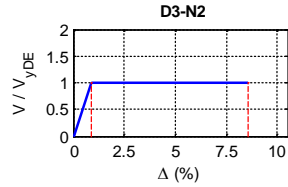
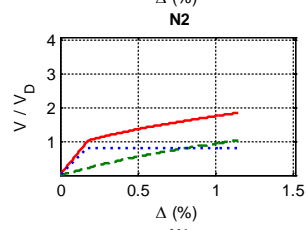
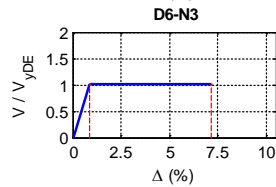
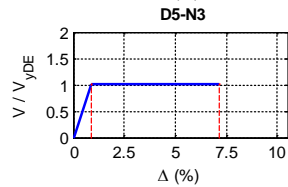
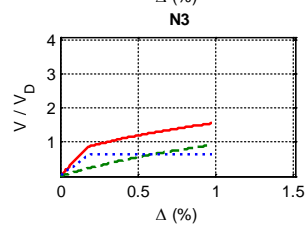
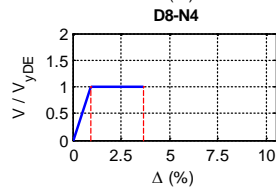
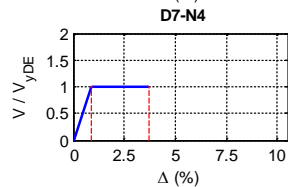
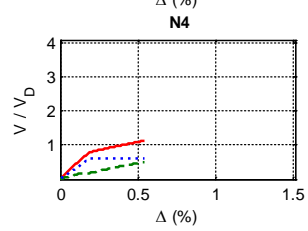
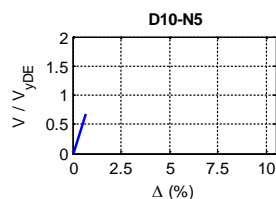
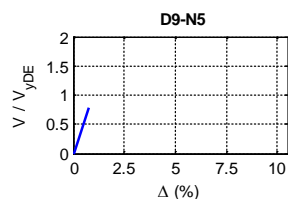
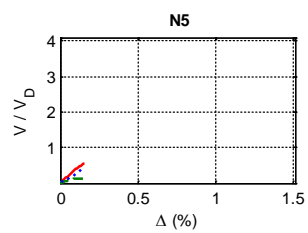
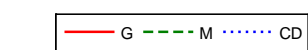
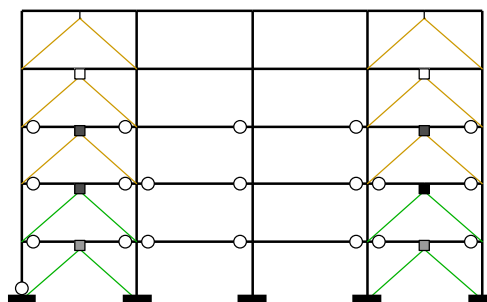
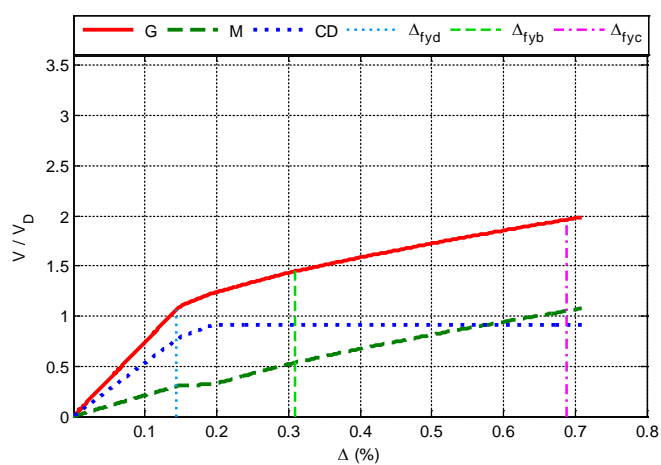


Figura A.25 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

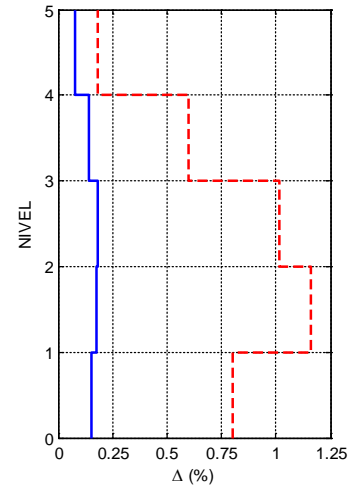
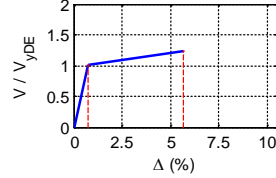
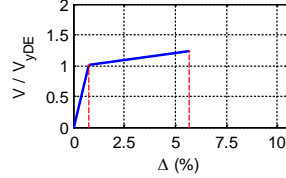
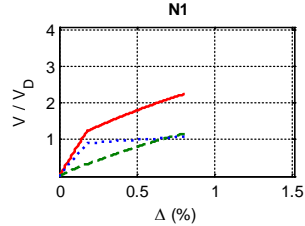
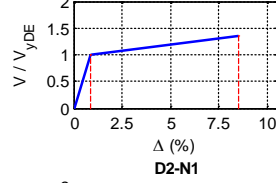
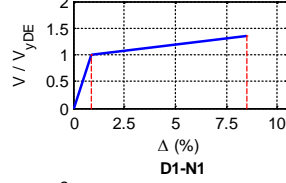
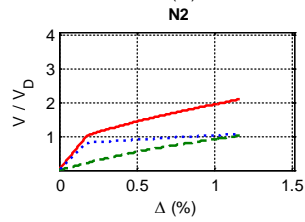
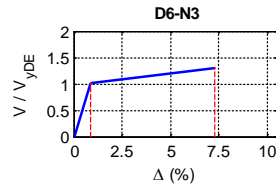
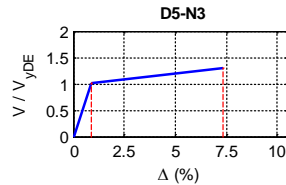
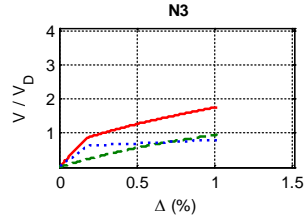
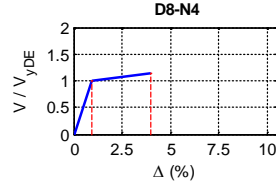
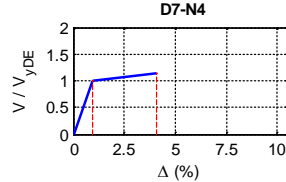
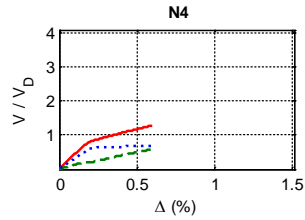
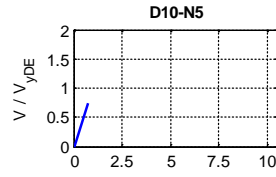
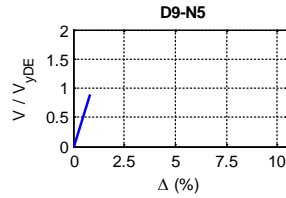
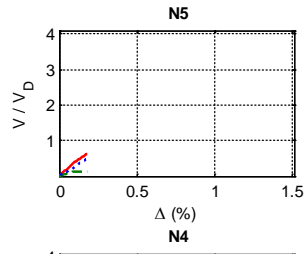
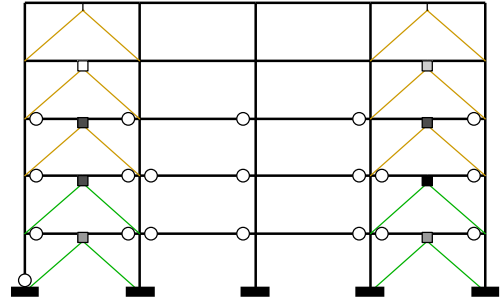
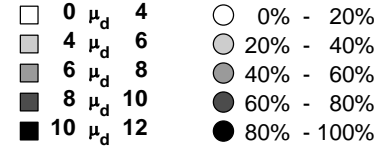
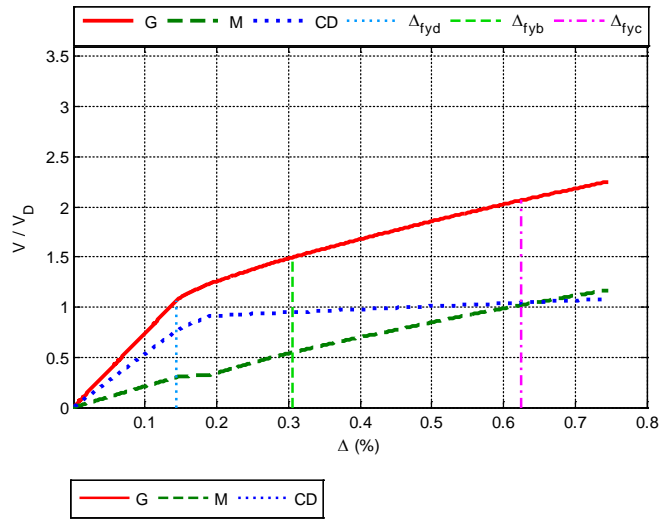


Figura A.26 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

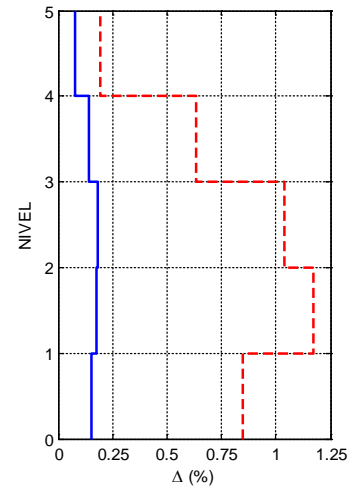
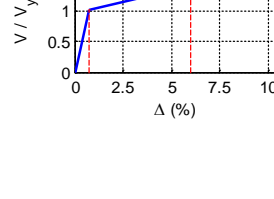
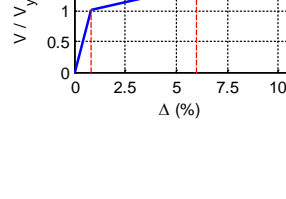
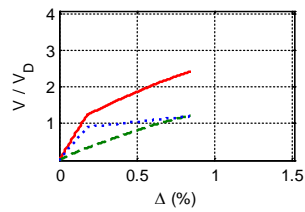
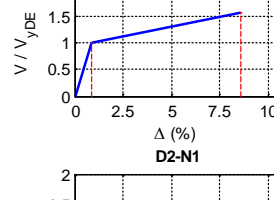
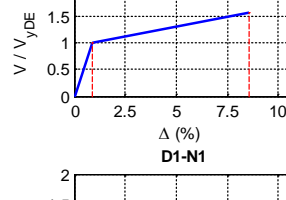
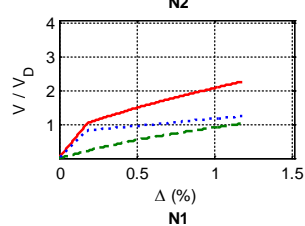
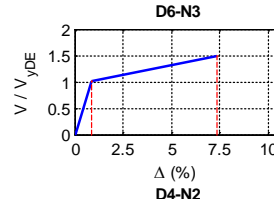
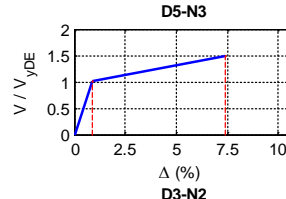
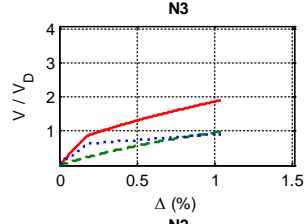
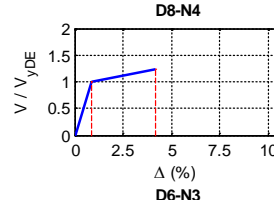
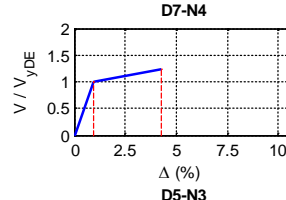
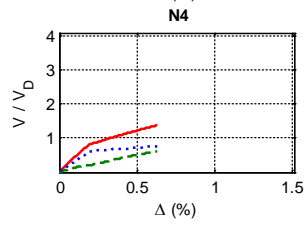
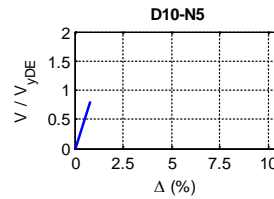
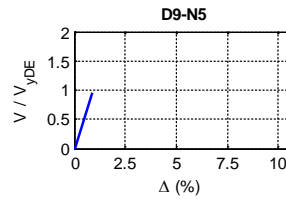
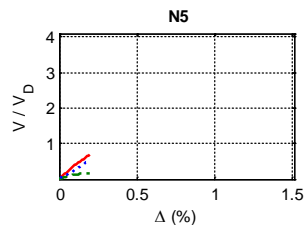
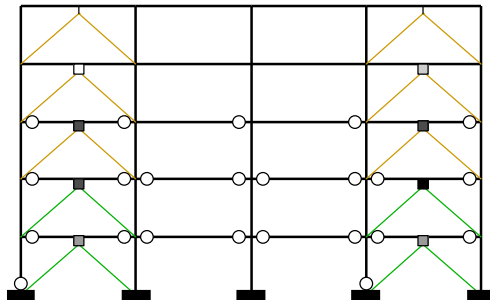
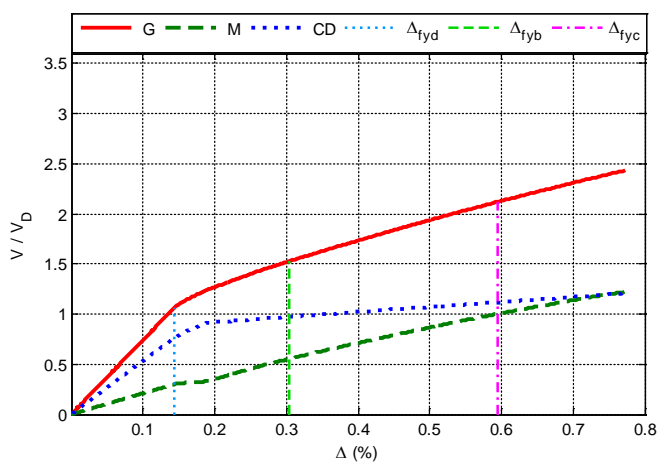


Figura A.27 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

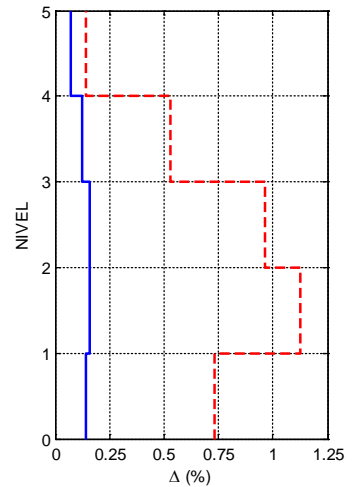
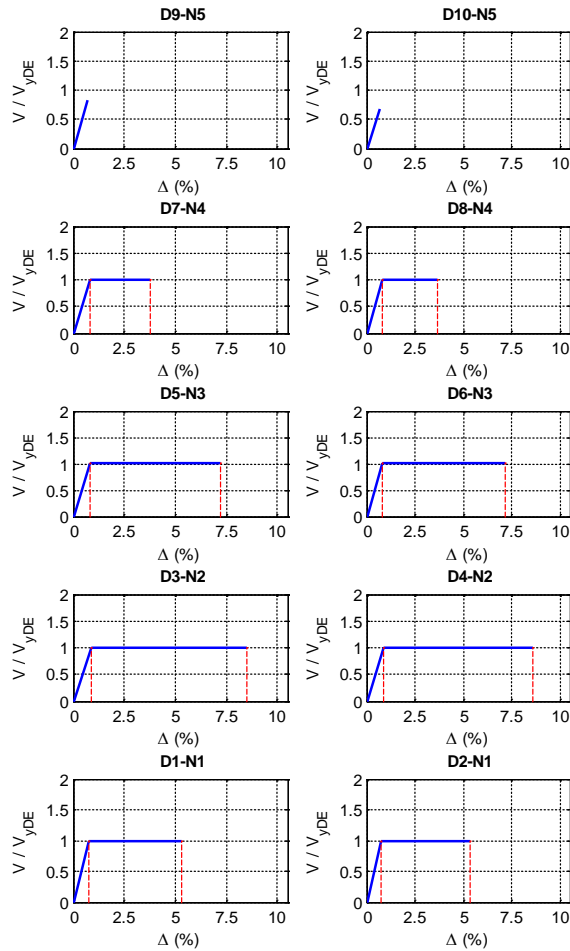
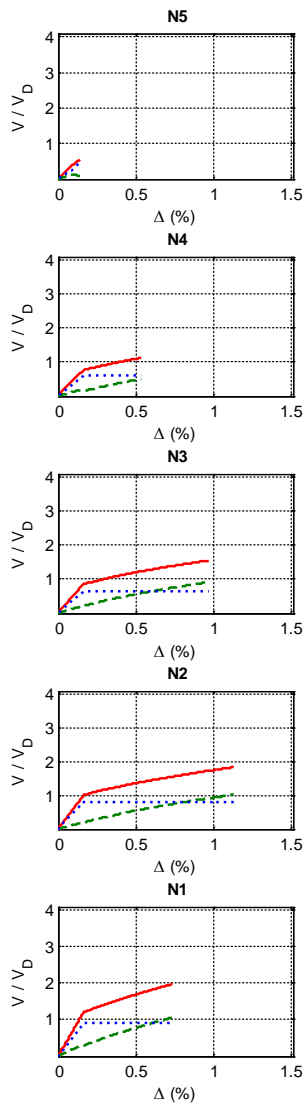
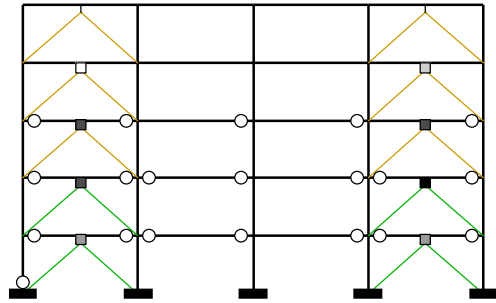
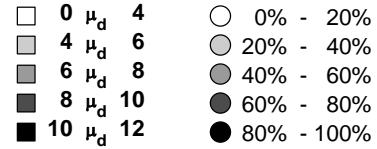
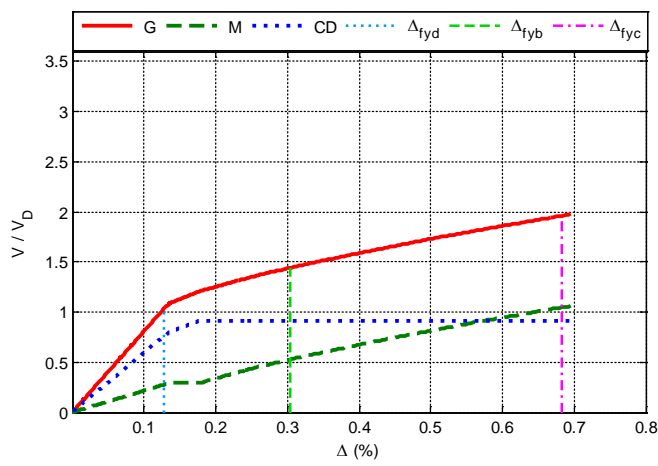


Figura A.28 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

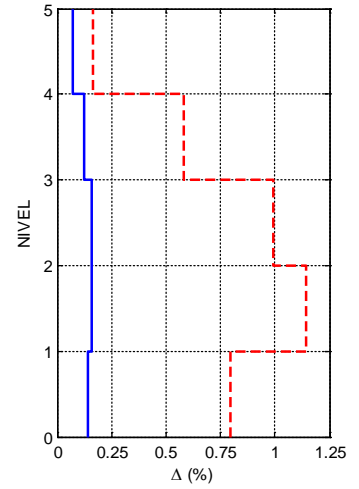
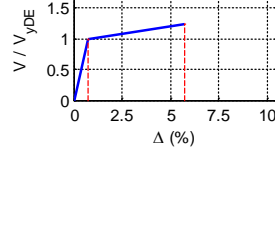
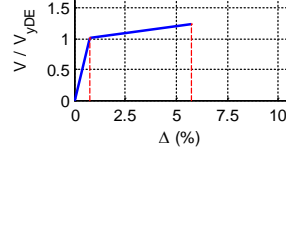
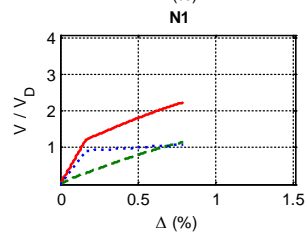
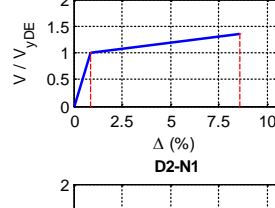
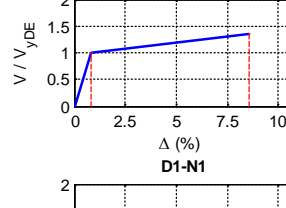
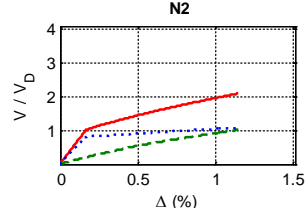
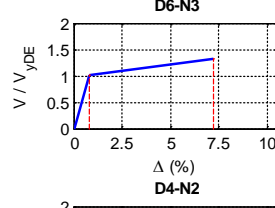
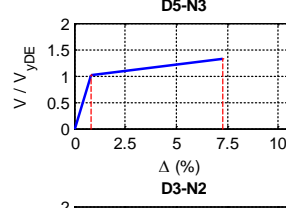
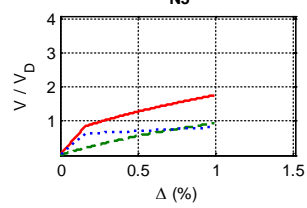
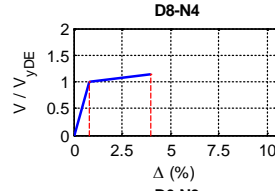
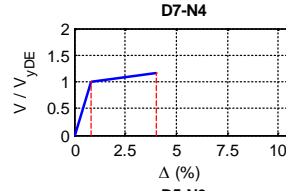
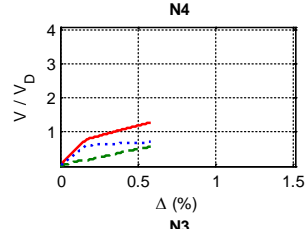
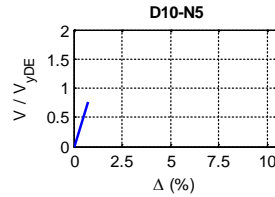
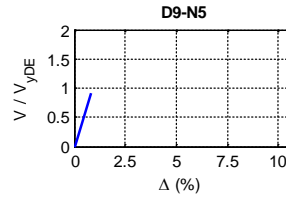
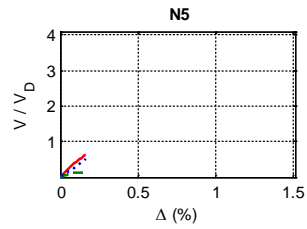
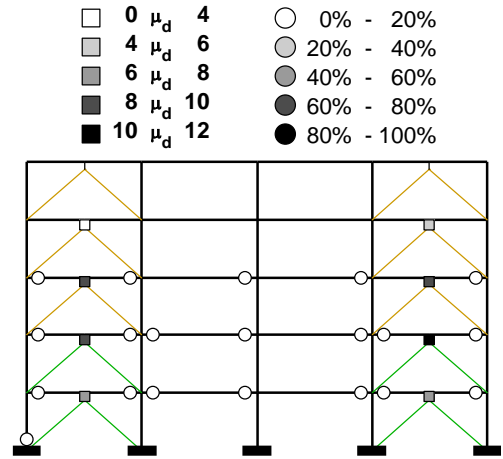
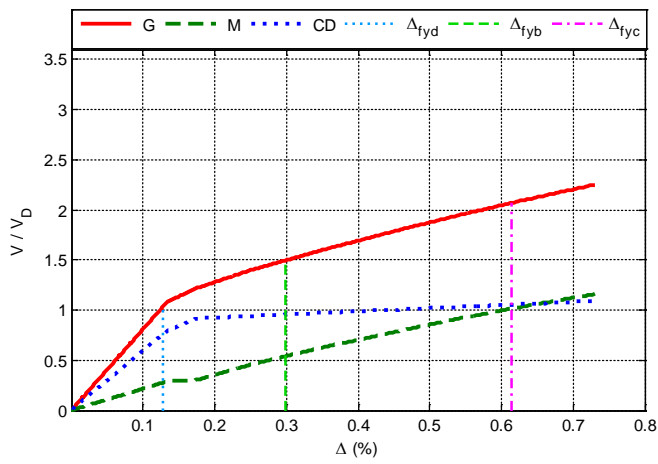


Figura A.29 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

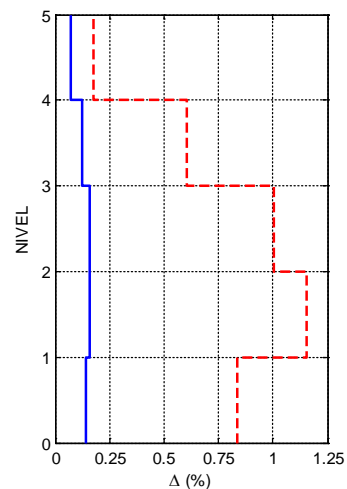
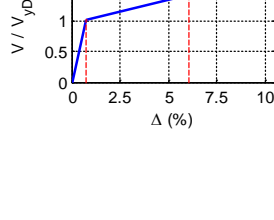
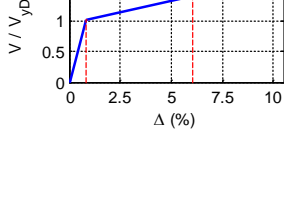
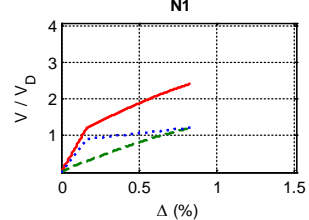
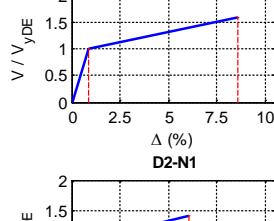
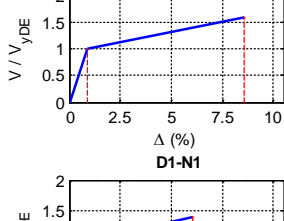
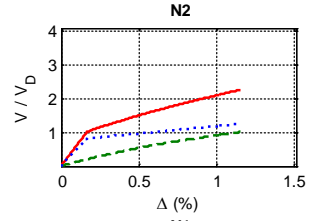
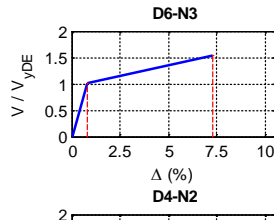
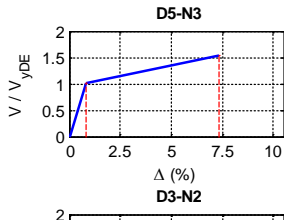
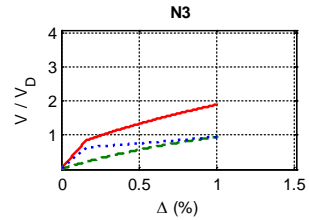
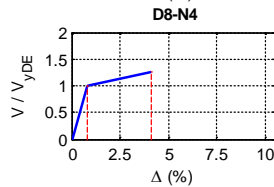
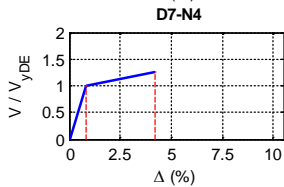
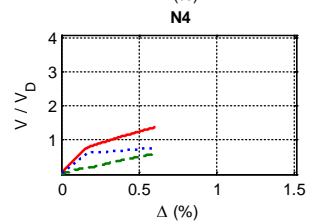
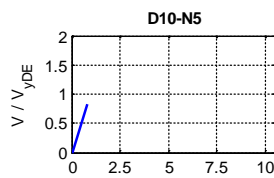
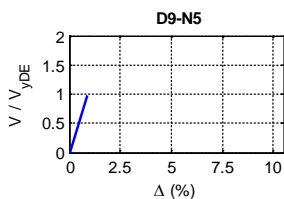
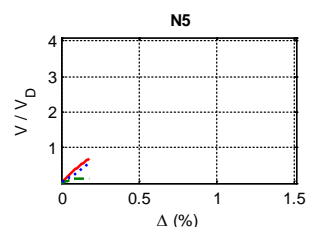
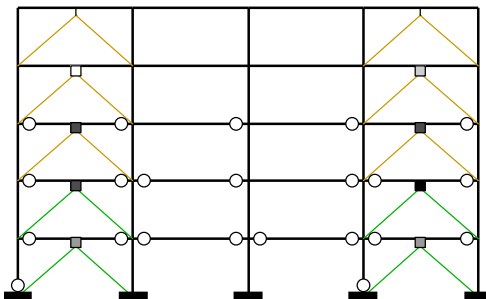
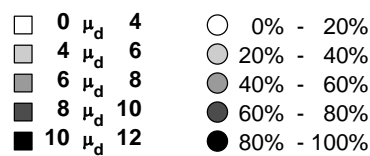
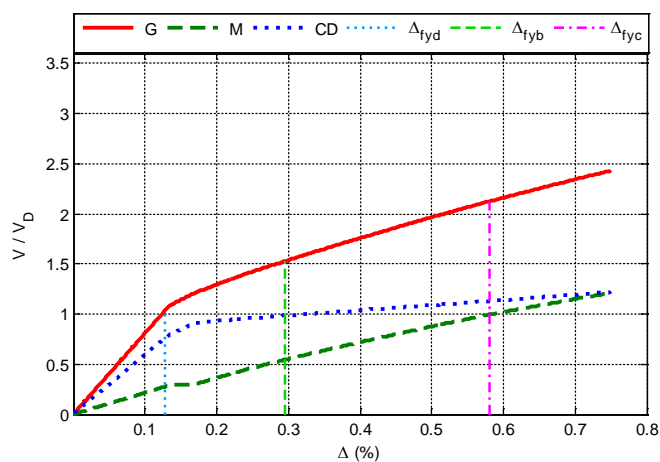


Figura A.30 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

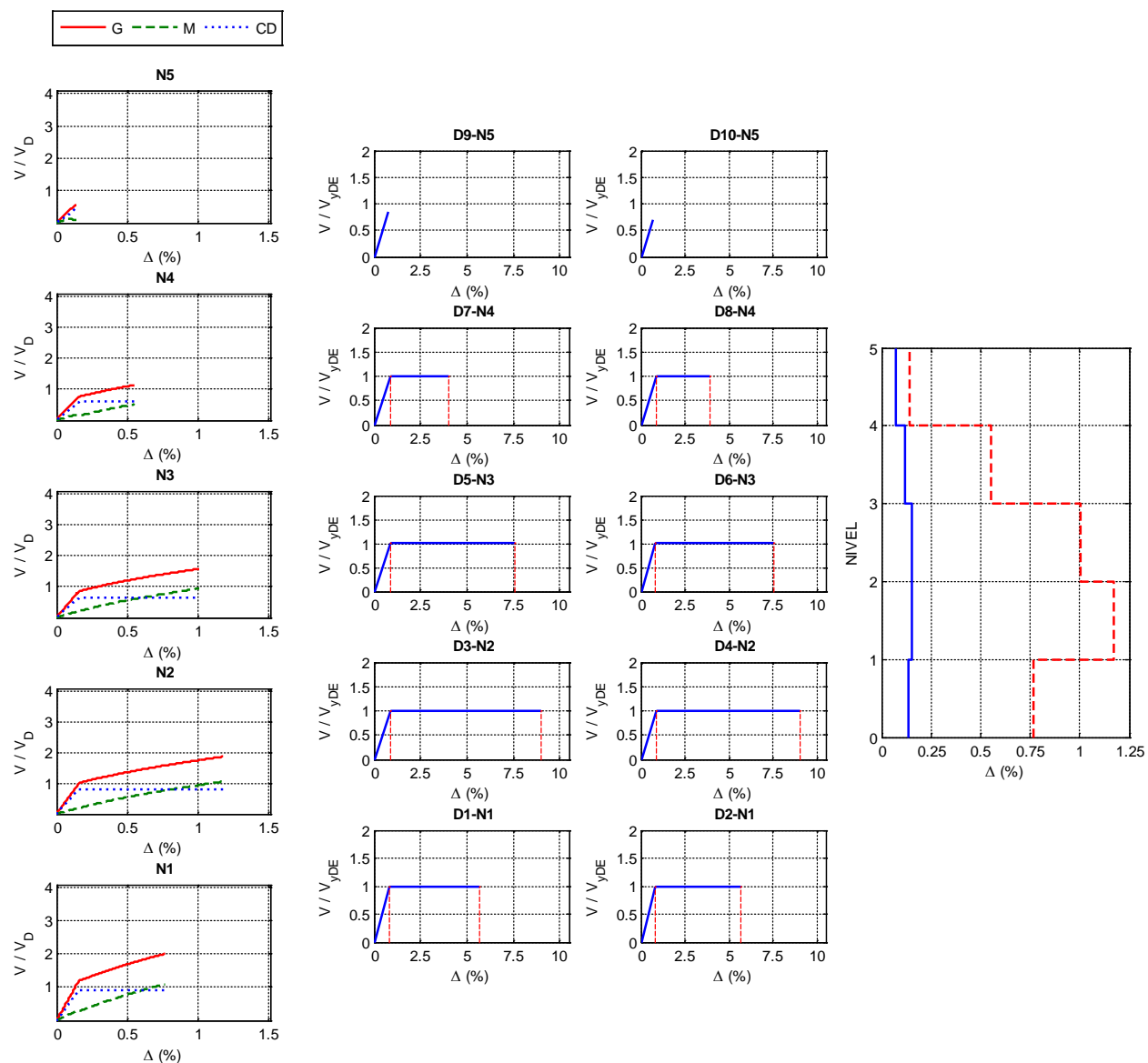
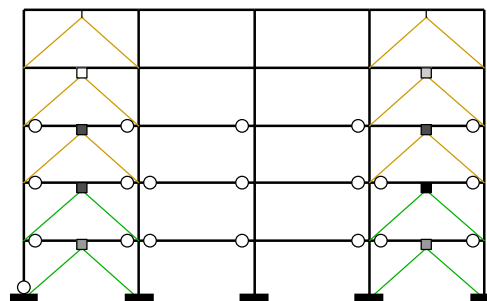
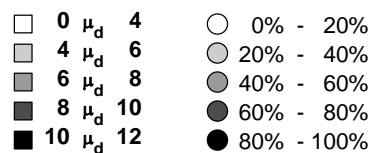
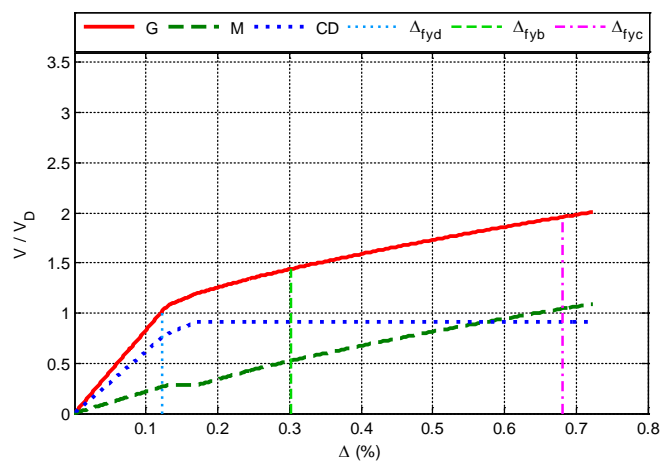


Figura A.31 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

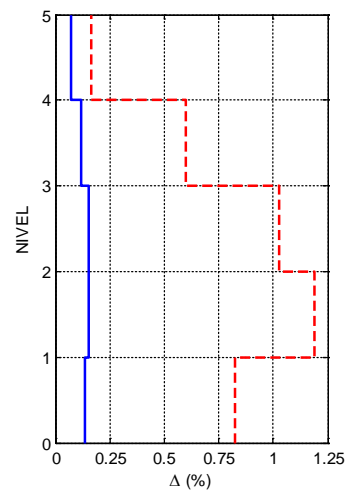
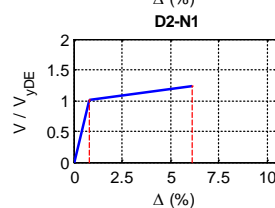
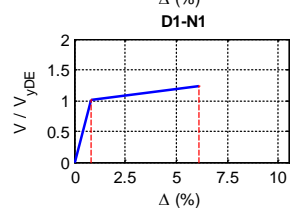
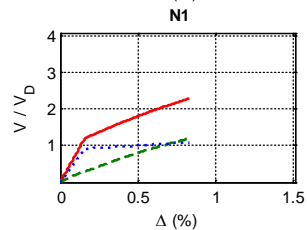
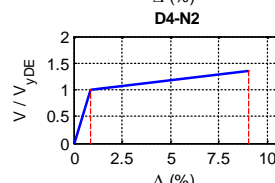
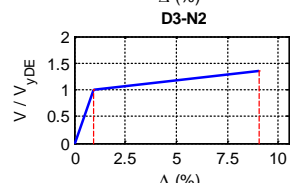
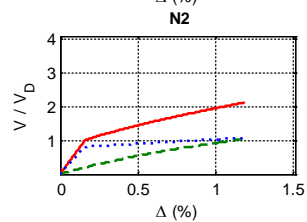
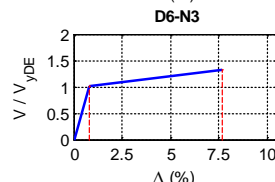
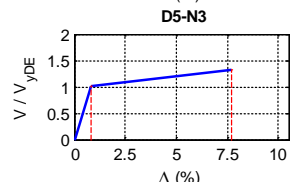
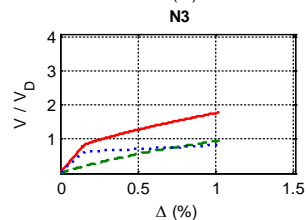
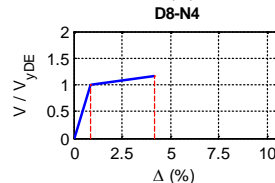
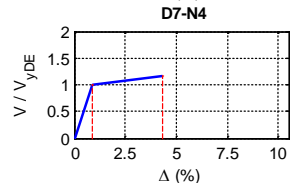
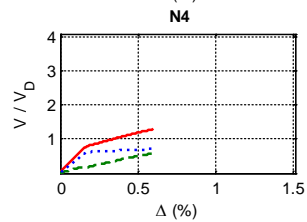
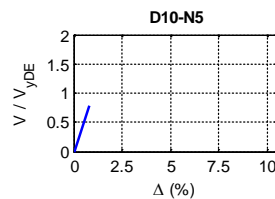
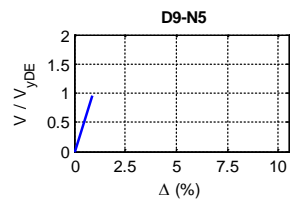
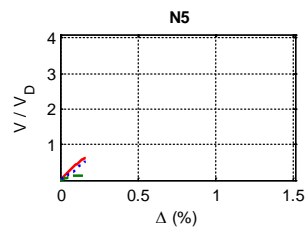
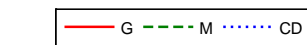
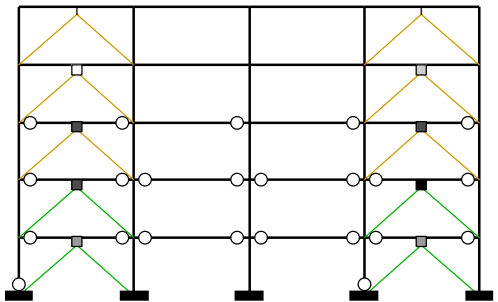
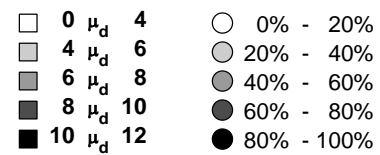
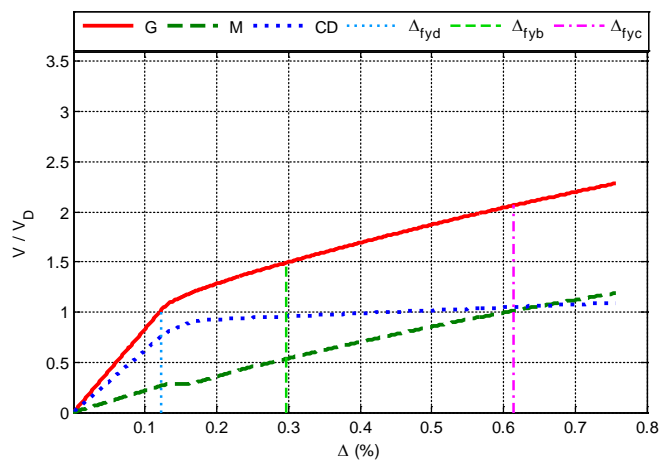


Figura A.32 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

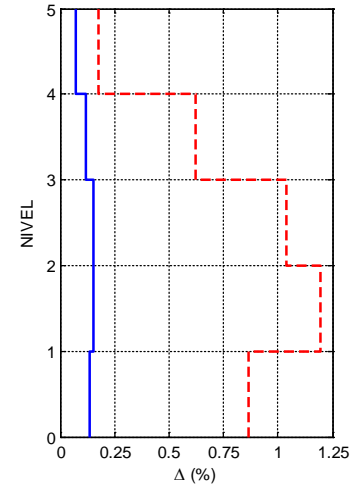
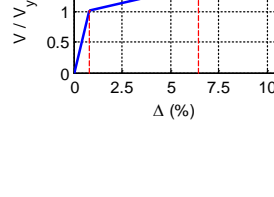
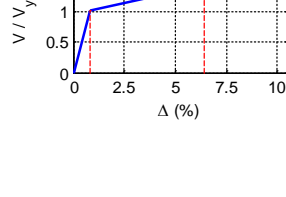
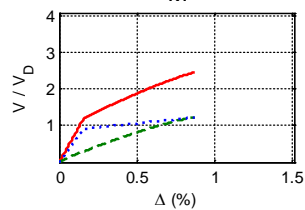
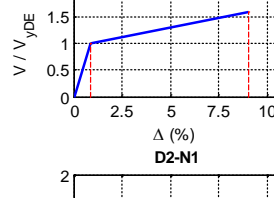
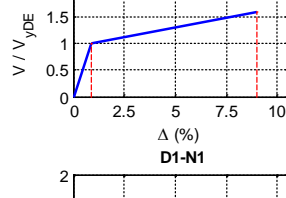
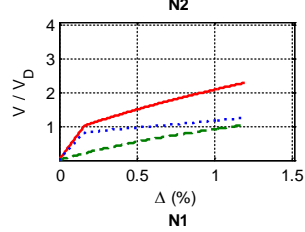
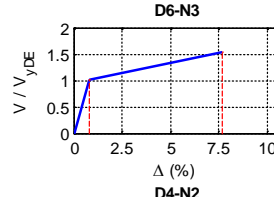
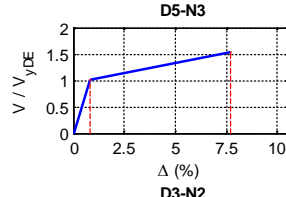
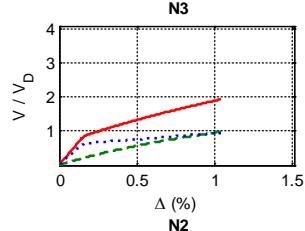
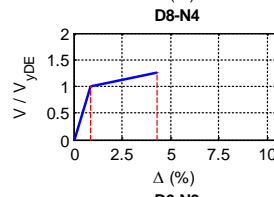
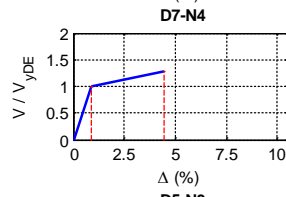
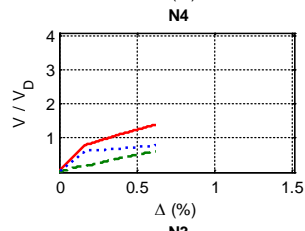
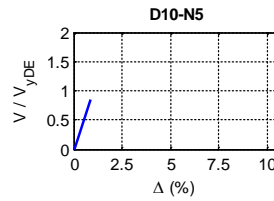
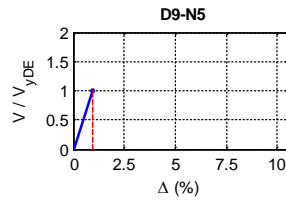
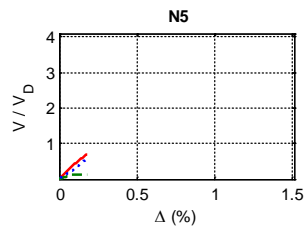
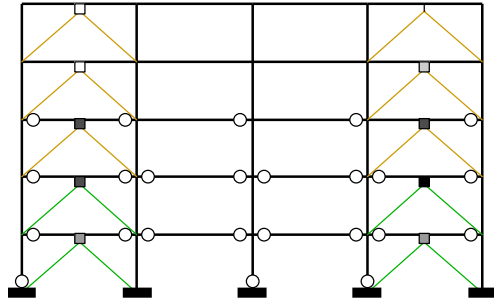
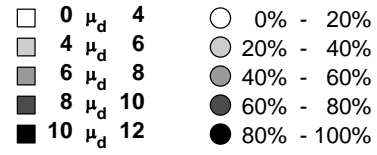
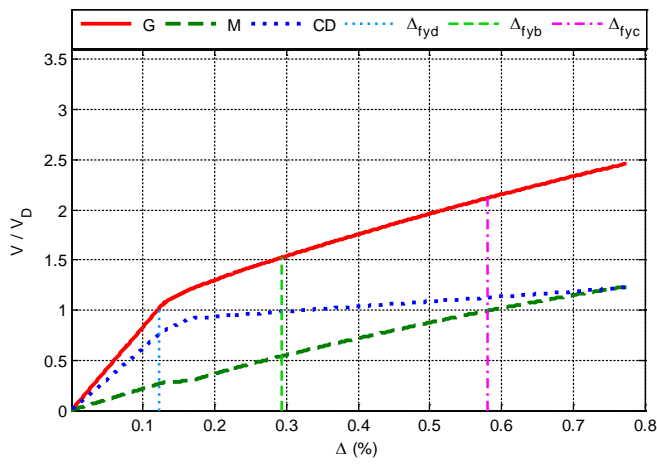


Figura A.33 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

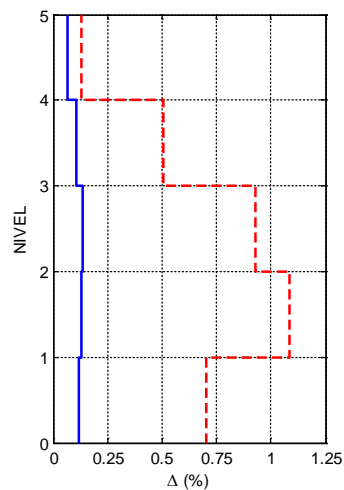
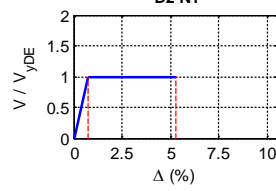
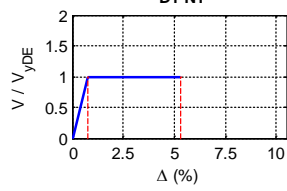
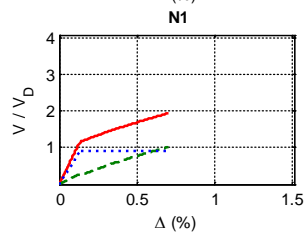
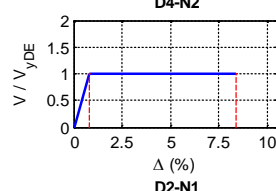
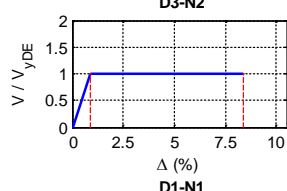
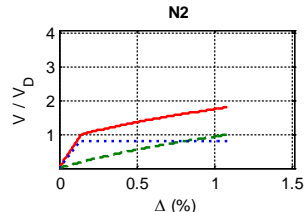
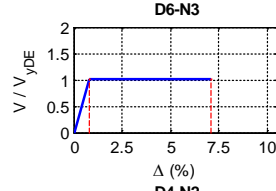
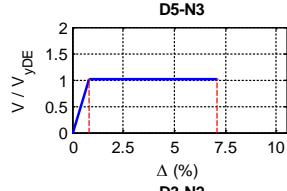
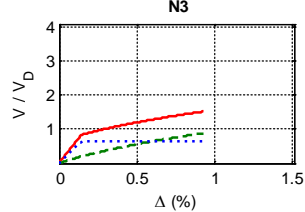
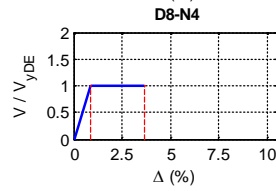
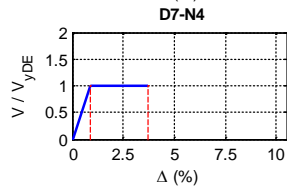
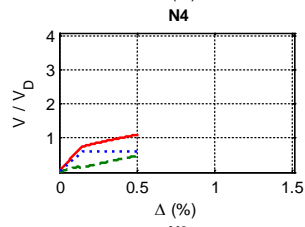
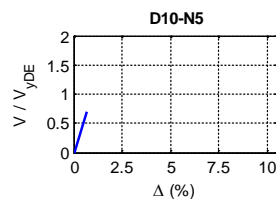
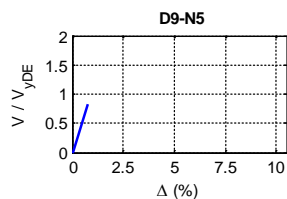
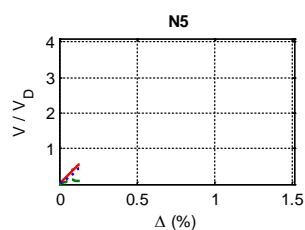
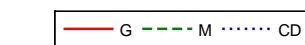
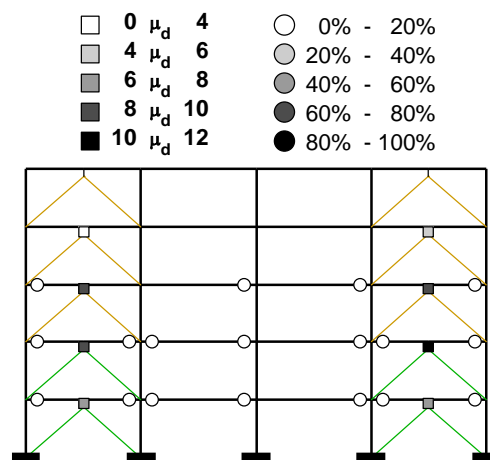
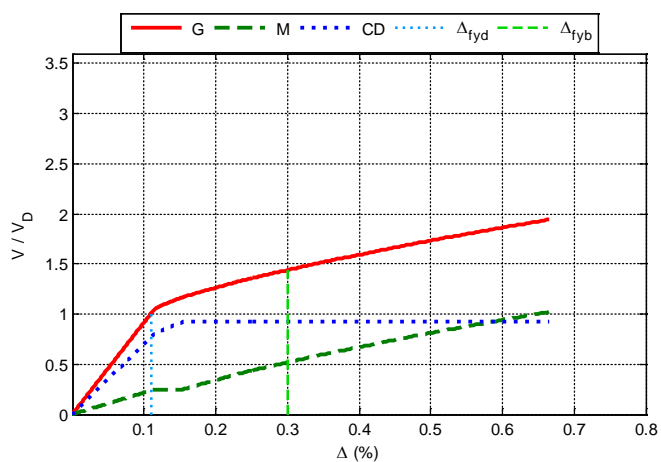


Figura A.34 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

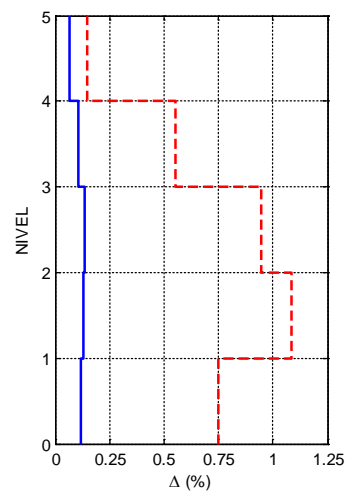
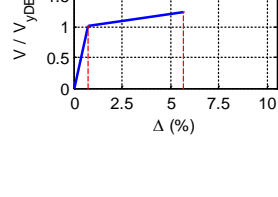
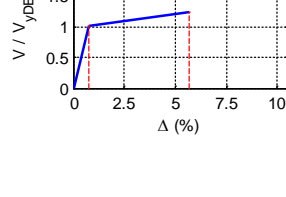
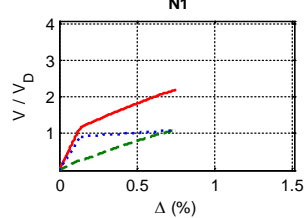
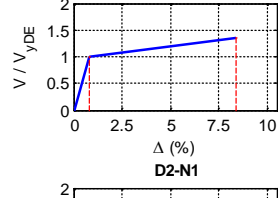
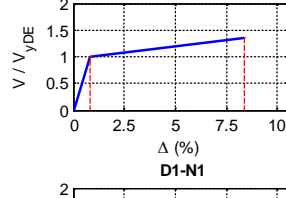
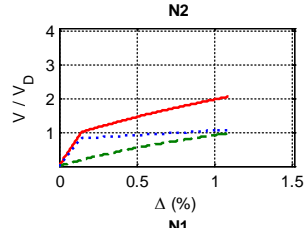
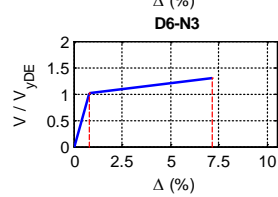
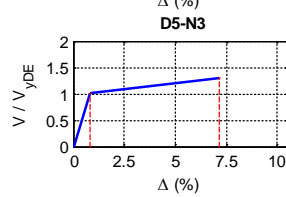
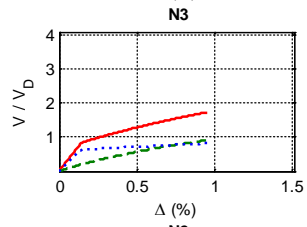
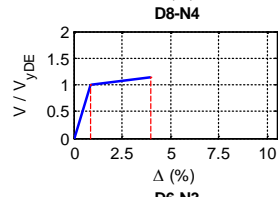
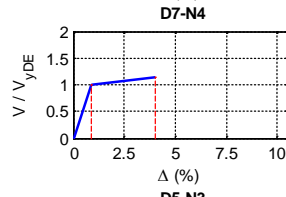
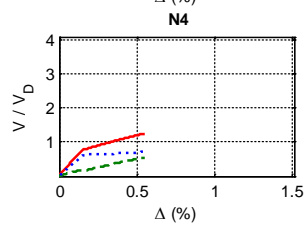
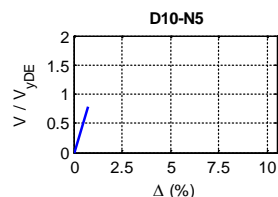
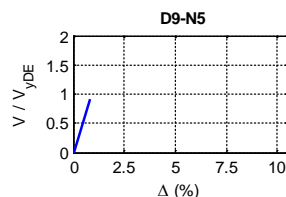
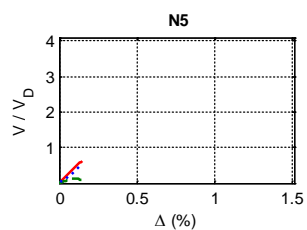
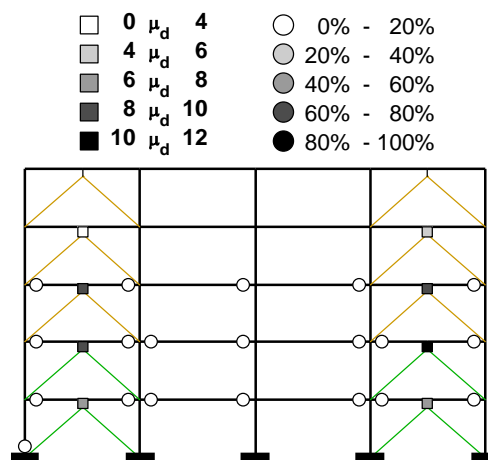
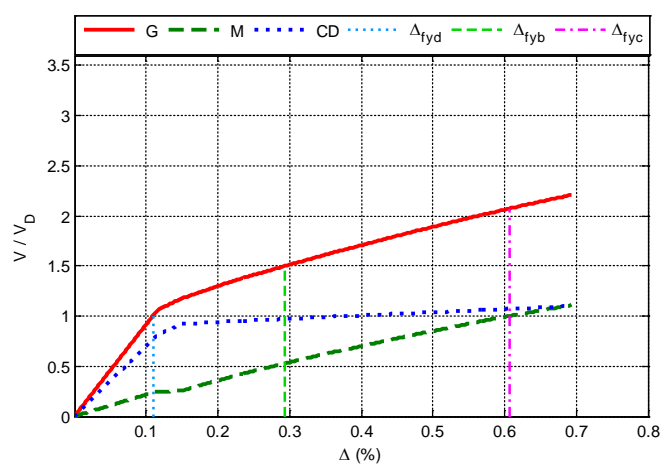


Figura A.35 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

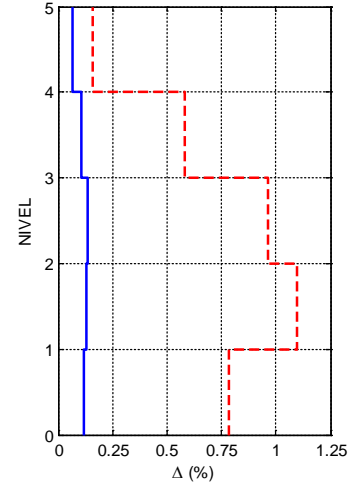
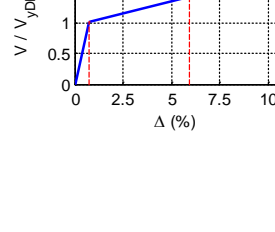
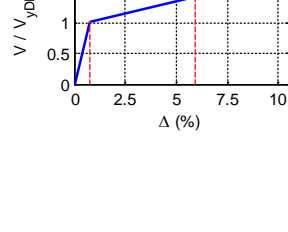
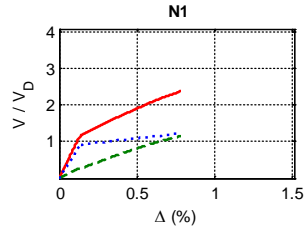
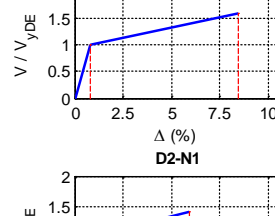
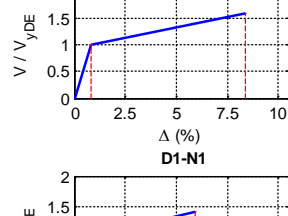
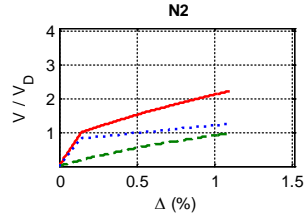
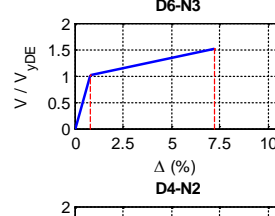
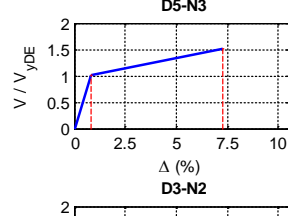
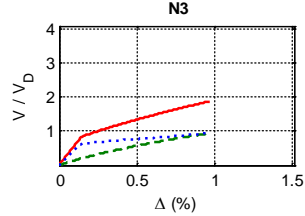
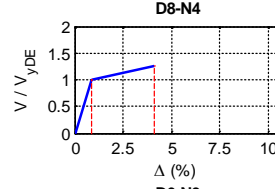
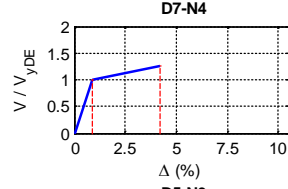
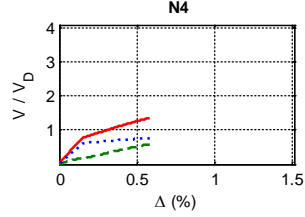
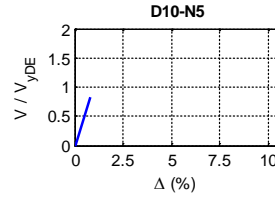
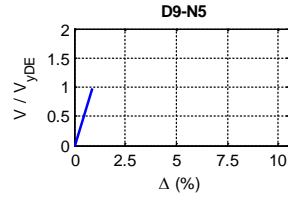
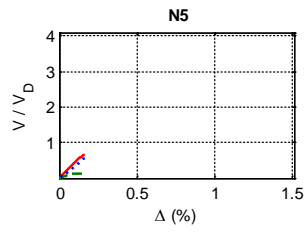
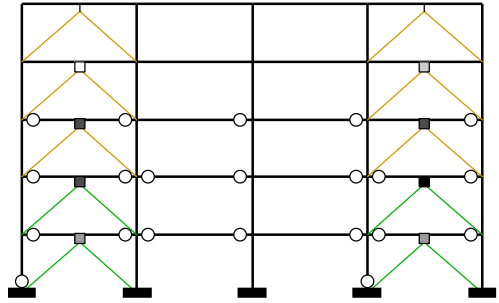
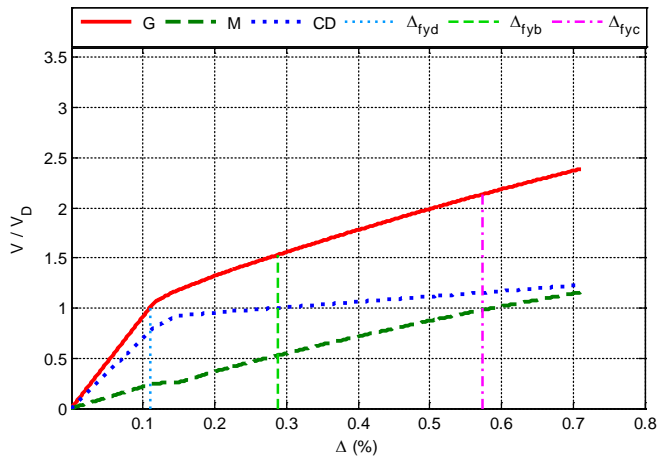


Figura A.36 $N = 5$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

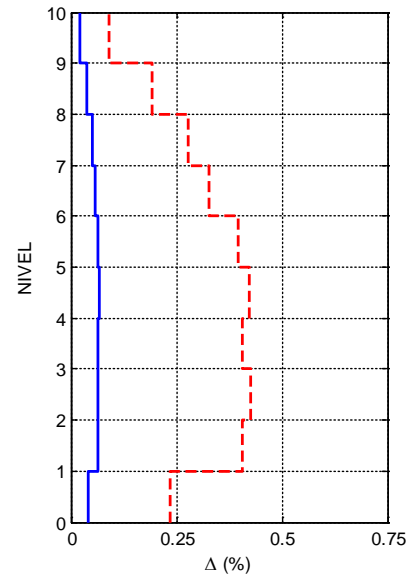
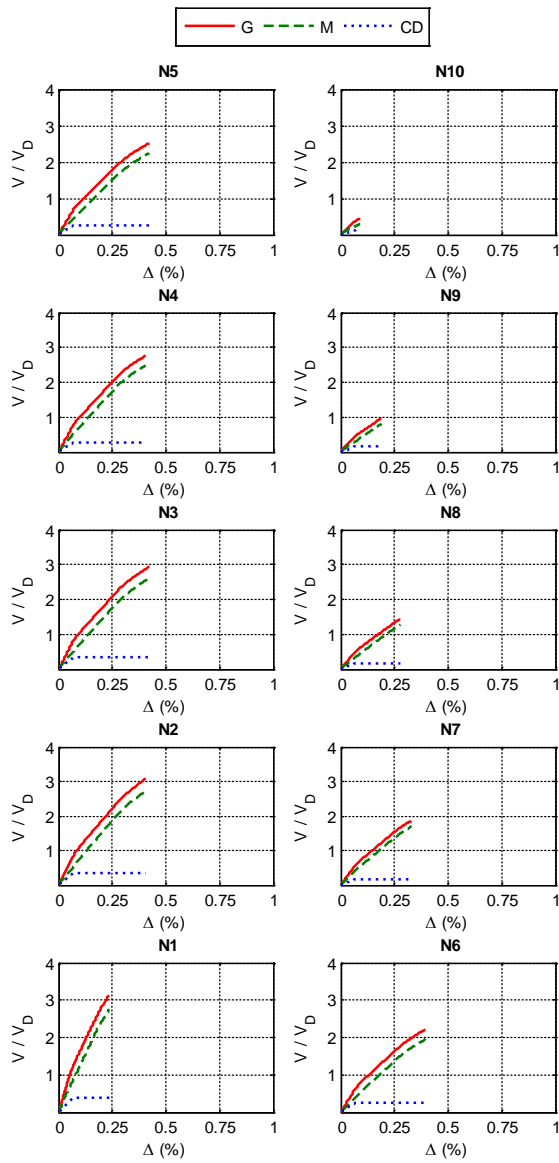
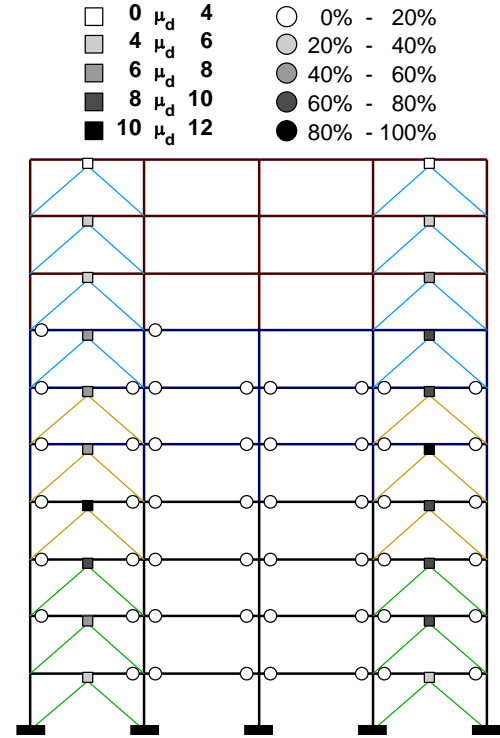
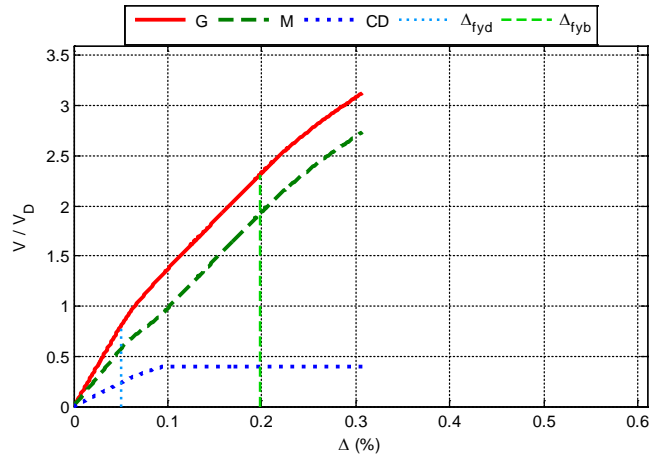


Figura A.37 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

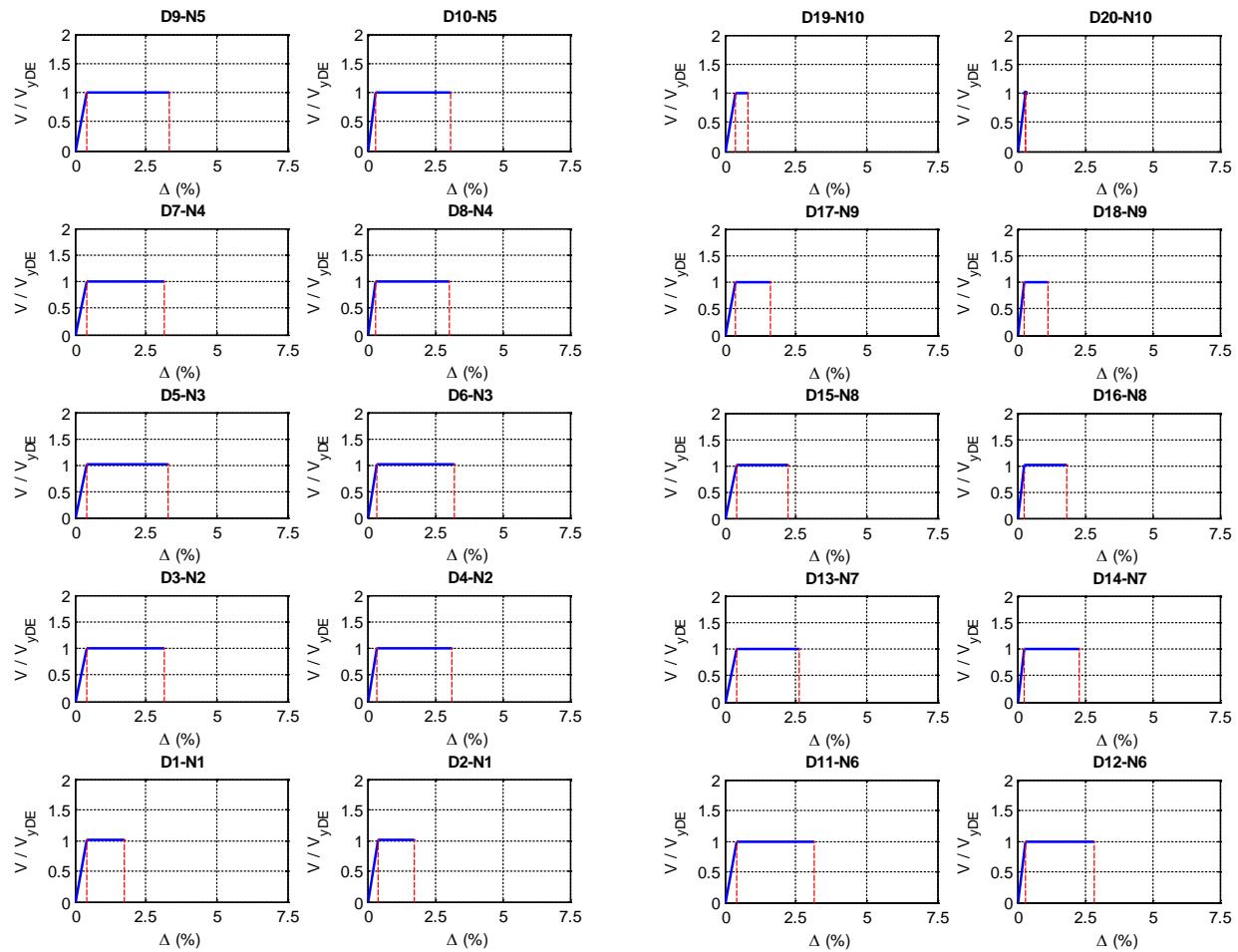


Figura A.38 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

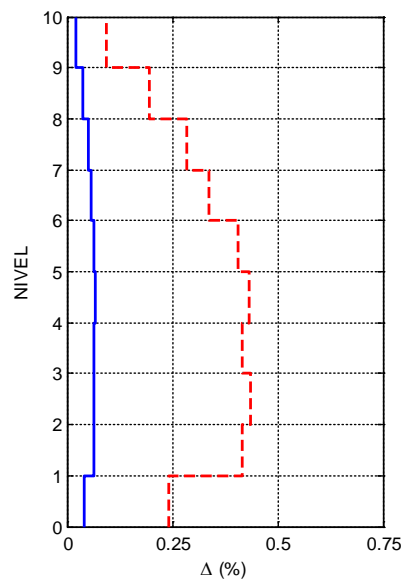
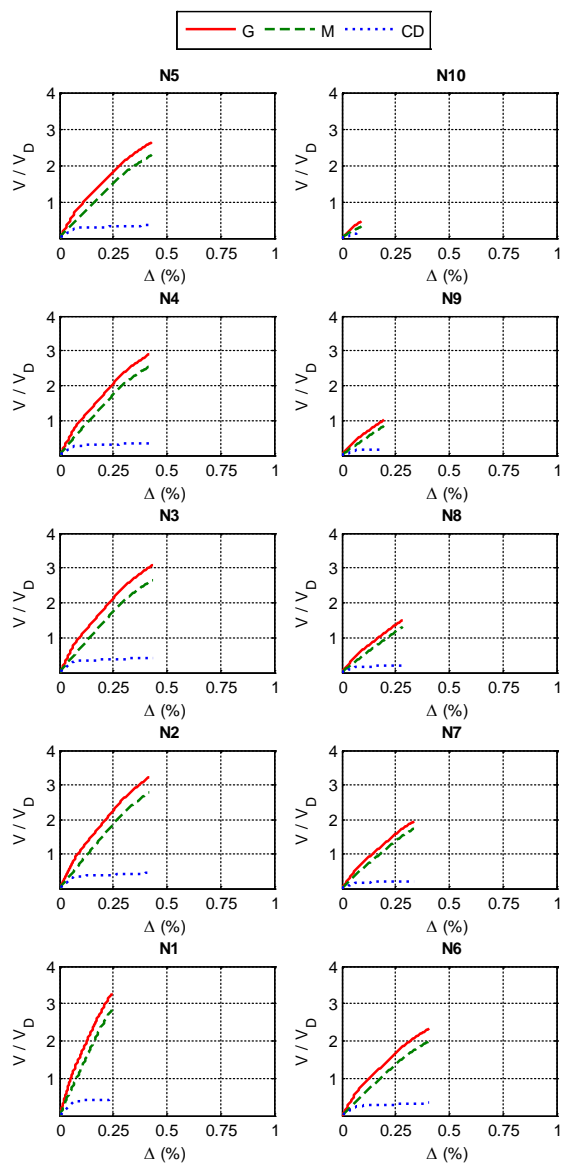
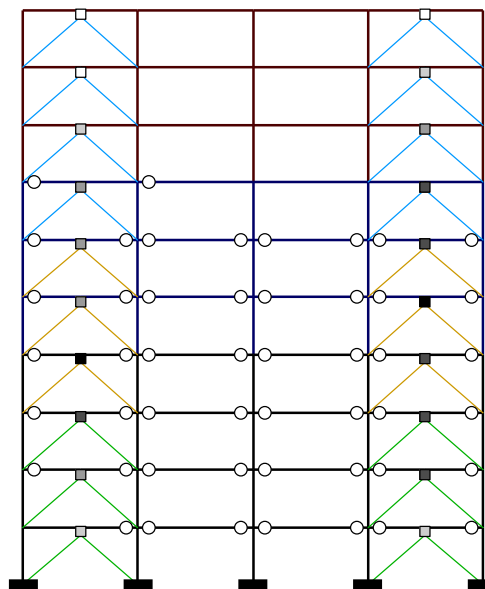
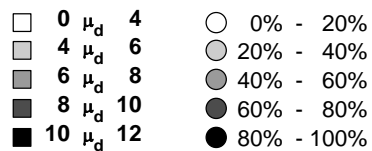
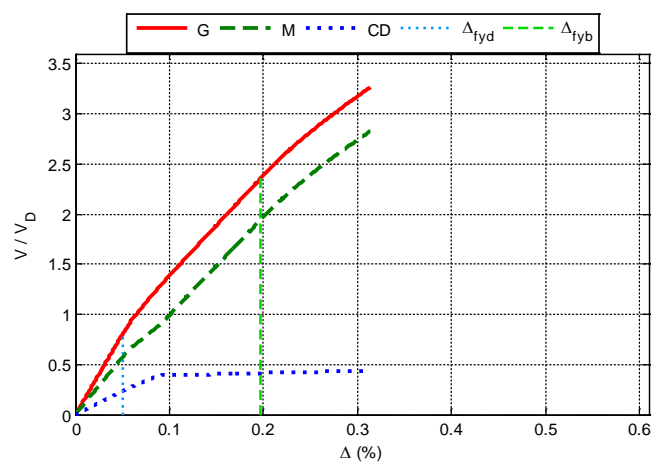


Figura A.39 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

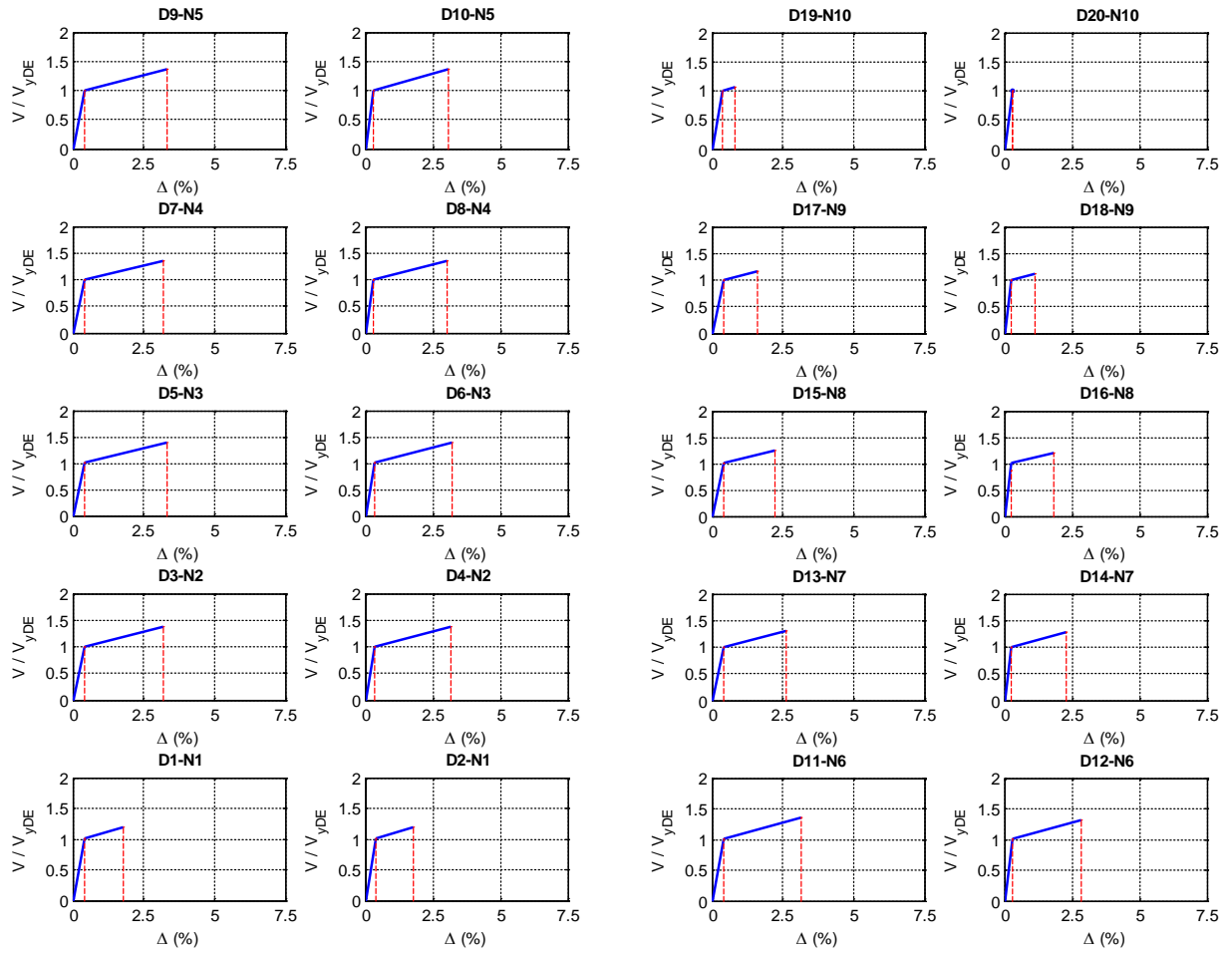


Figura A.40 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

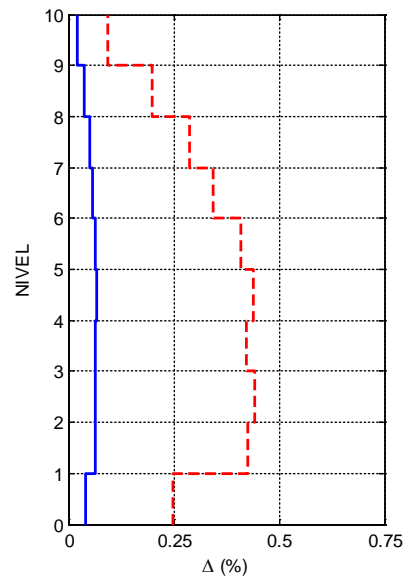
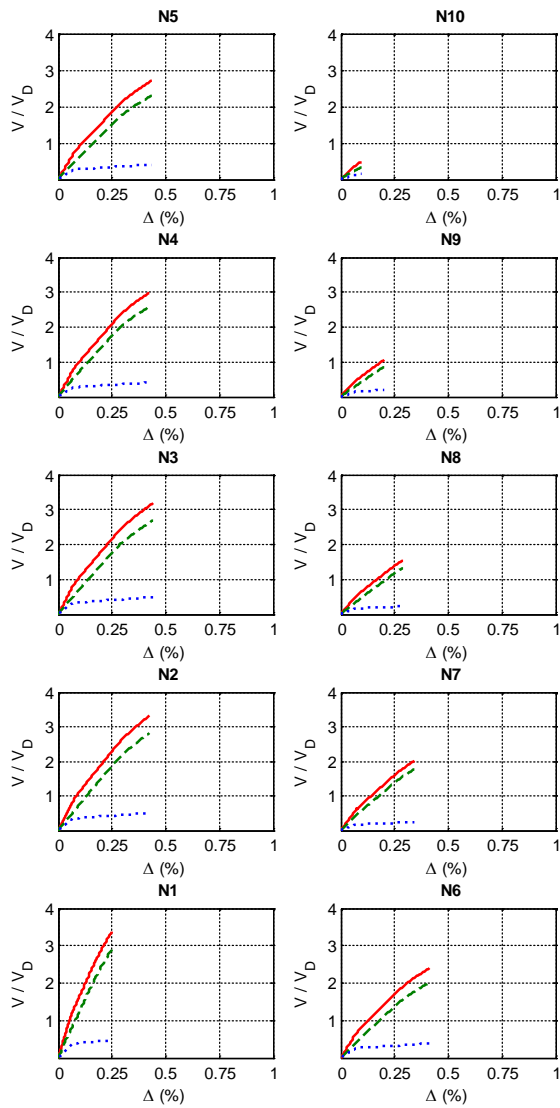
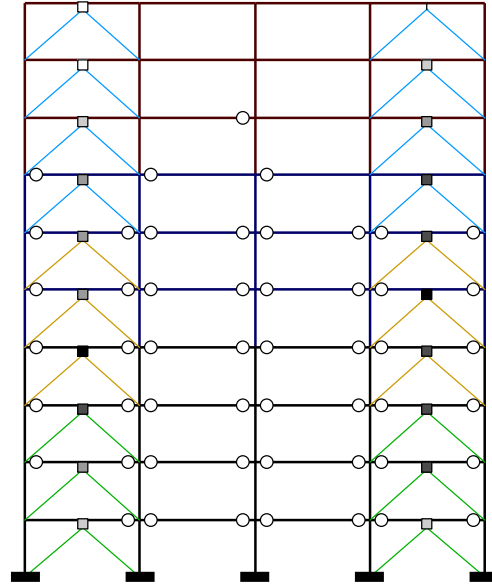
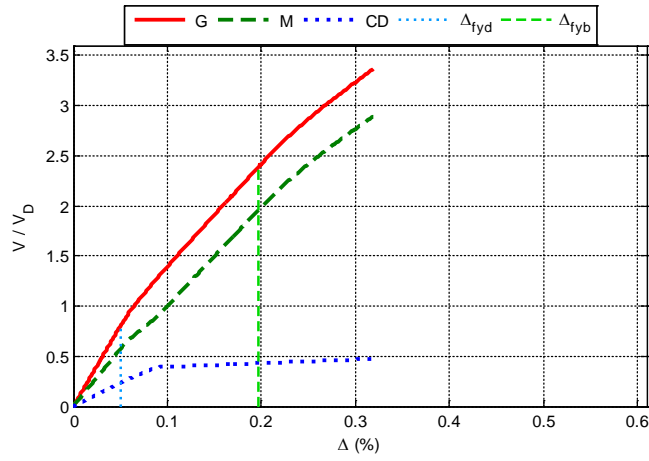


Figura A.41 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

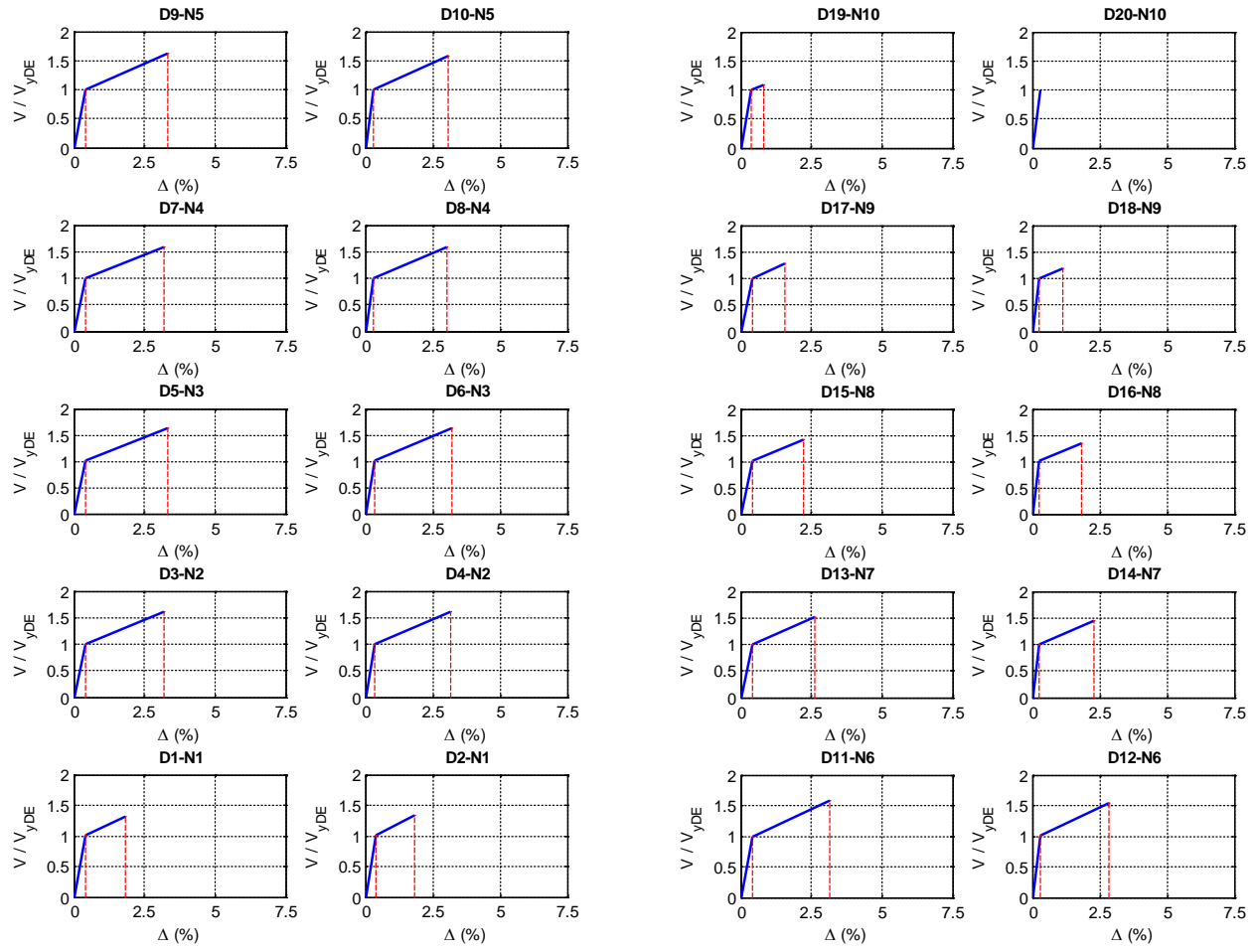


Figura A.42 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

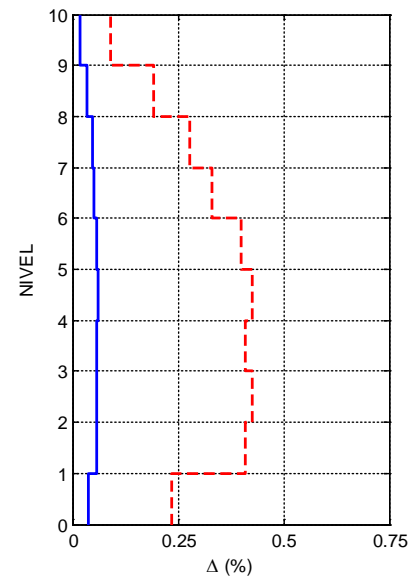
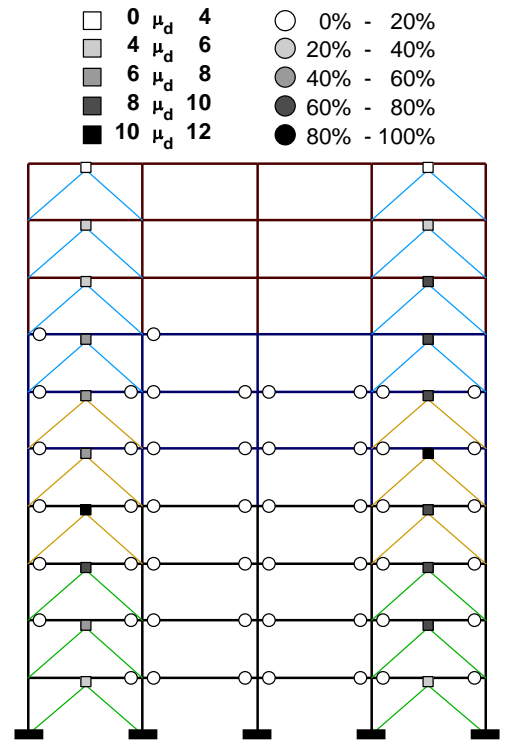
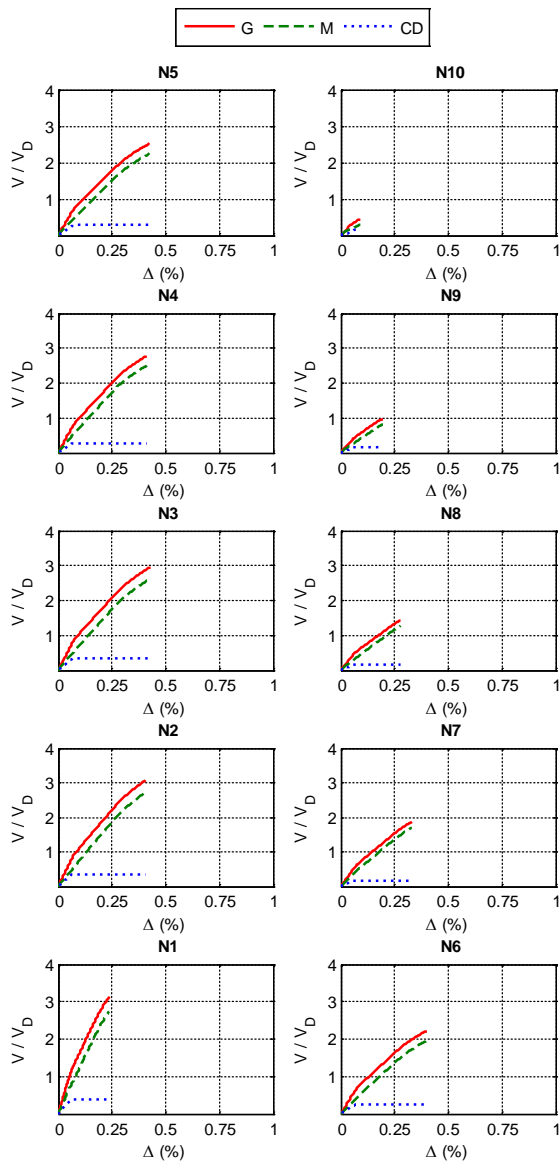
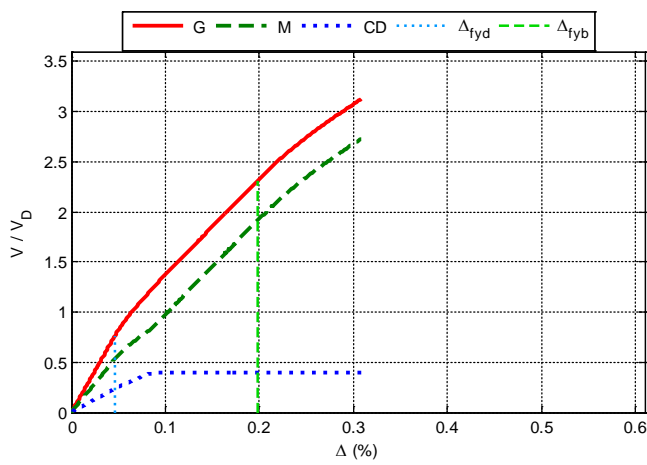


Figura A.43 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

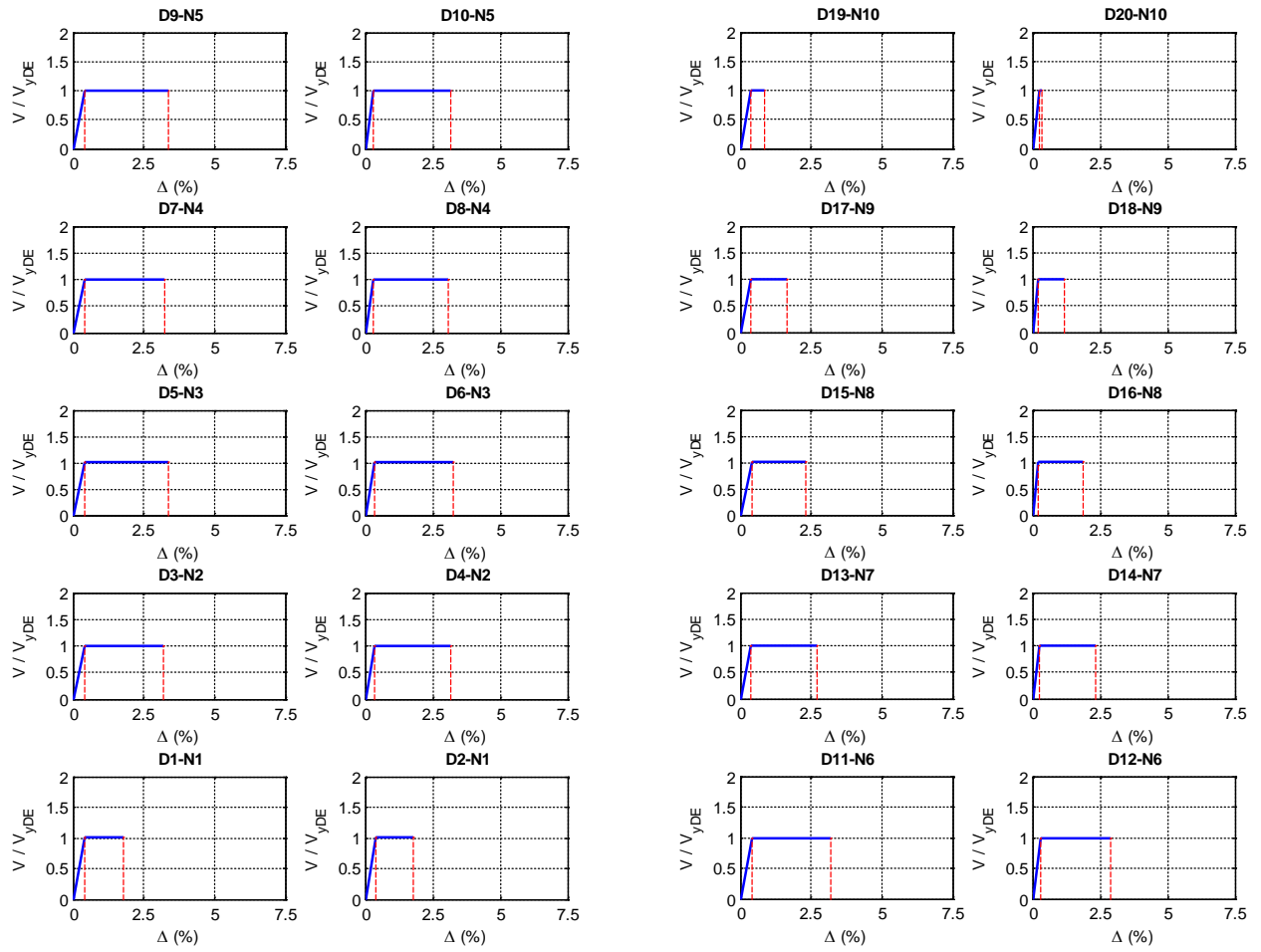


Figura A.44 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

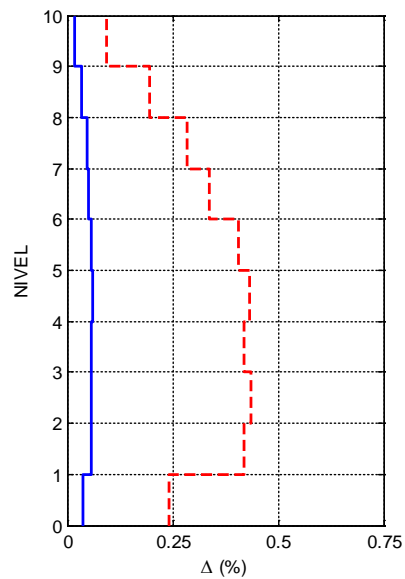
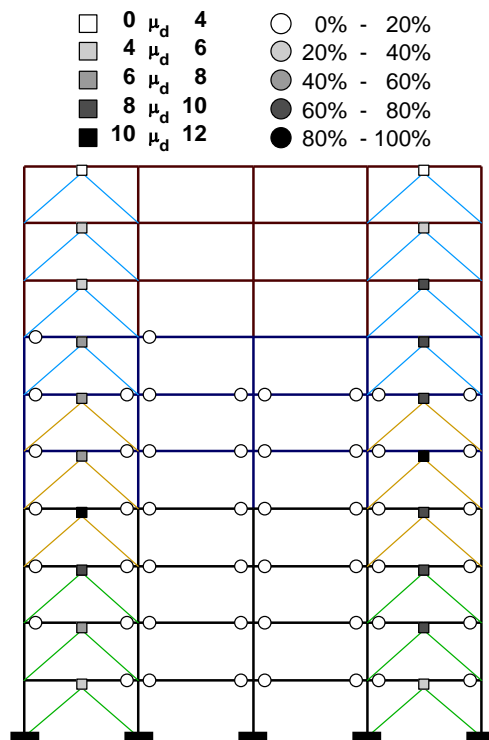
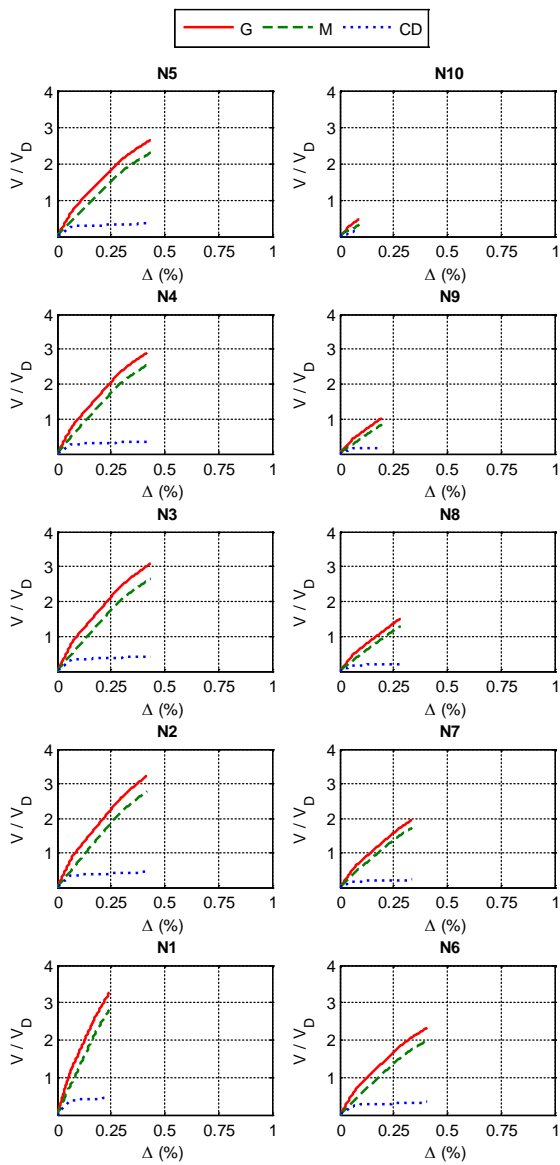
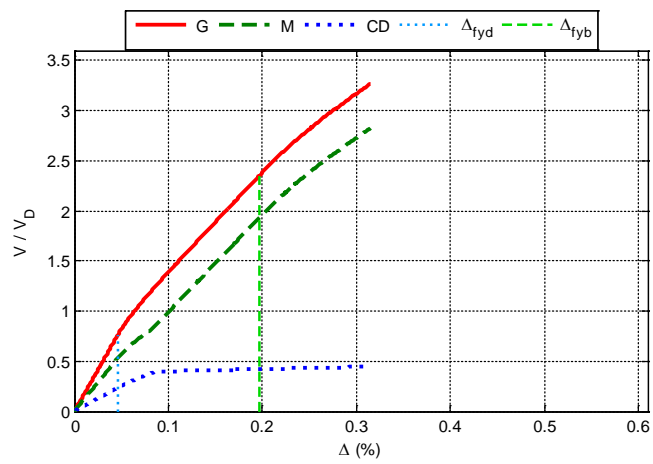


Figura A.45 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

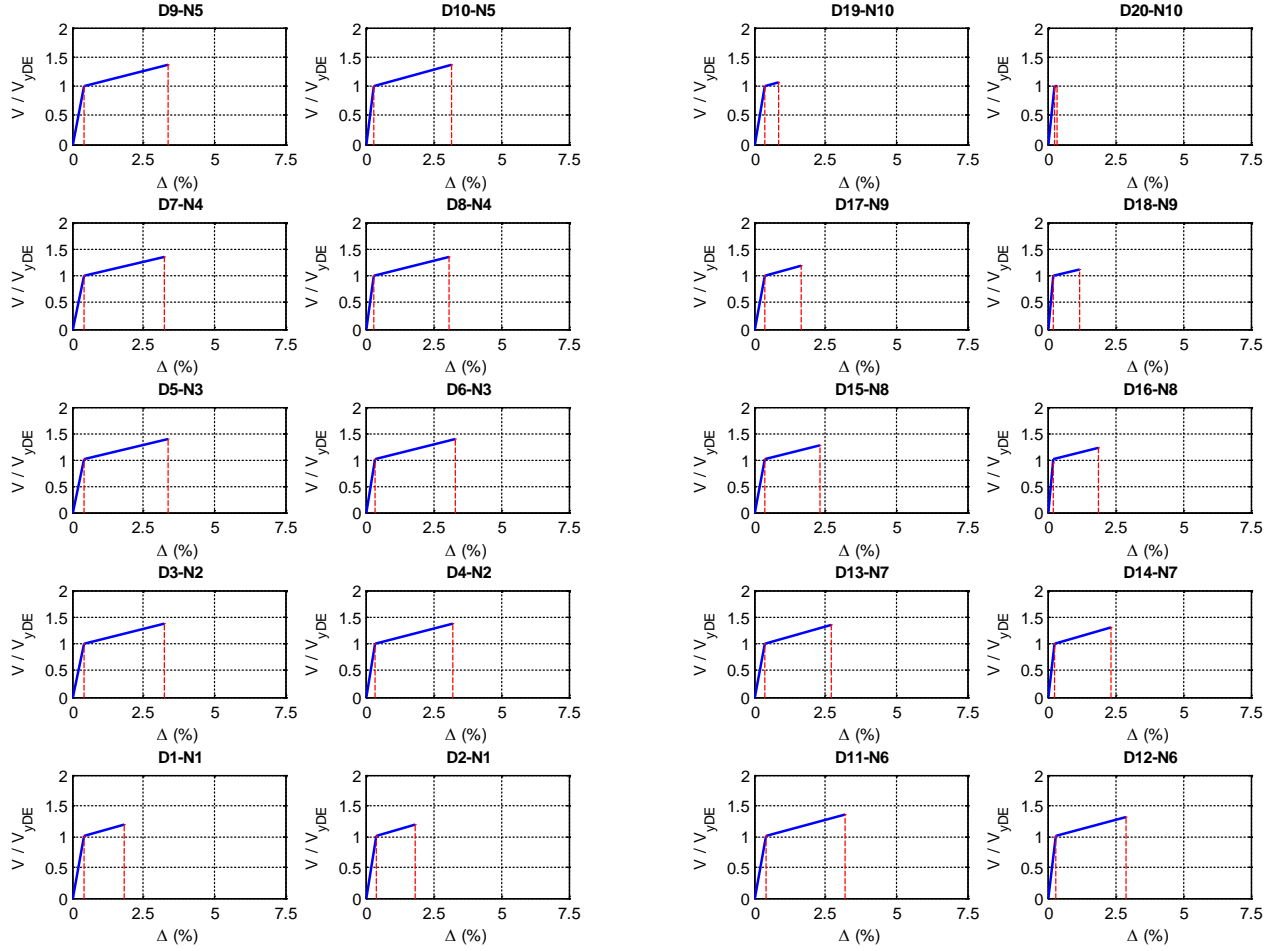


Figura A.46 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

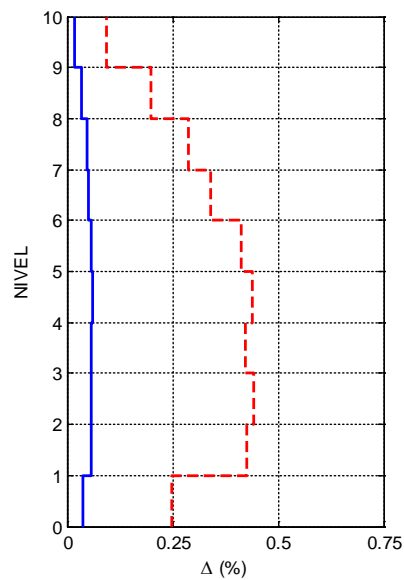
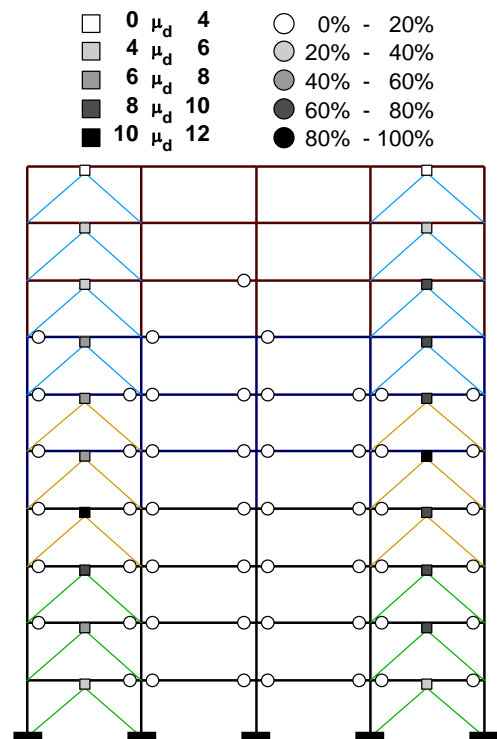
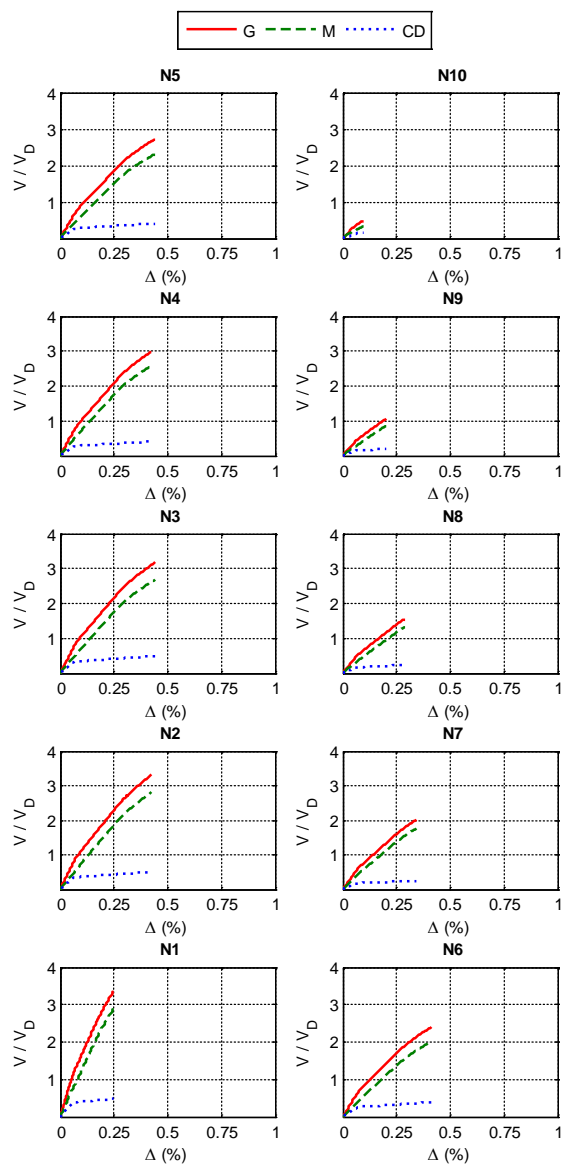
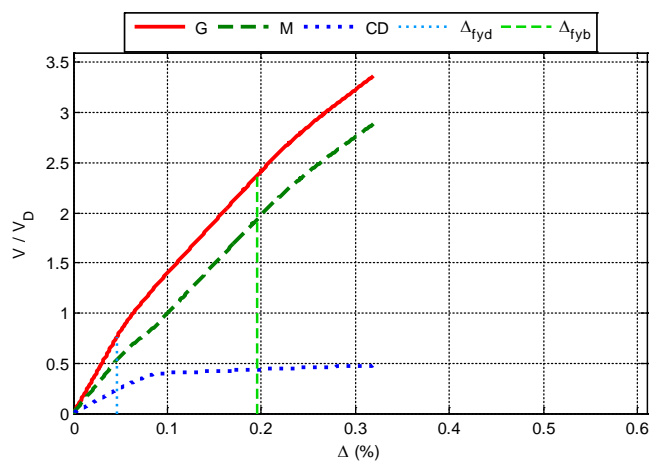


Figura A.47 $N = 10$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

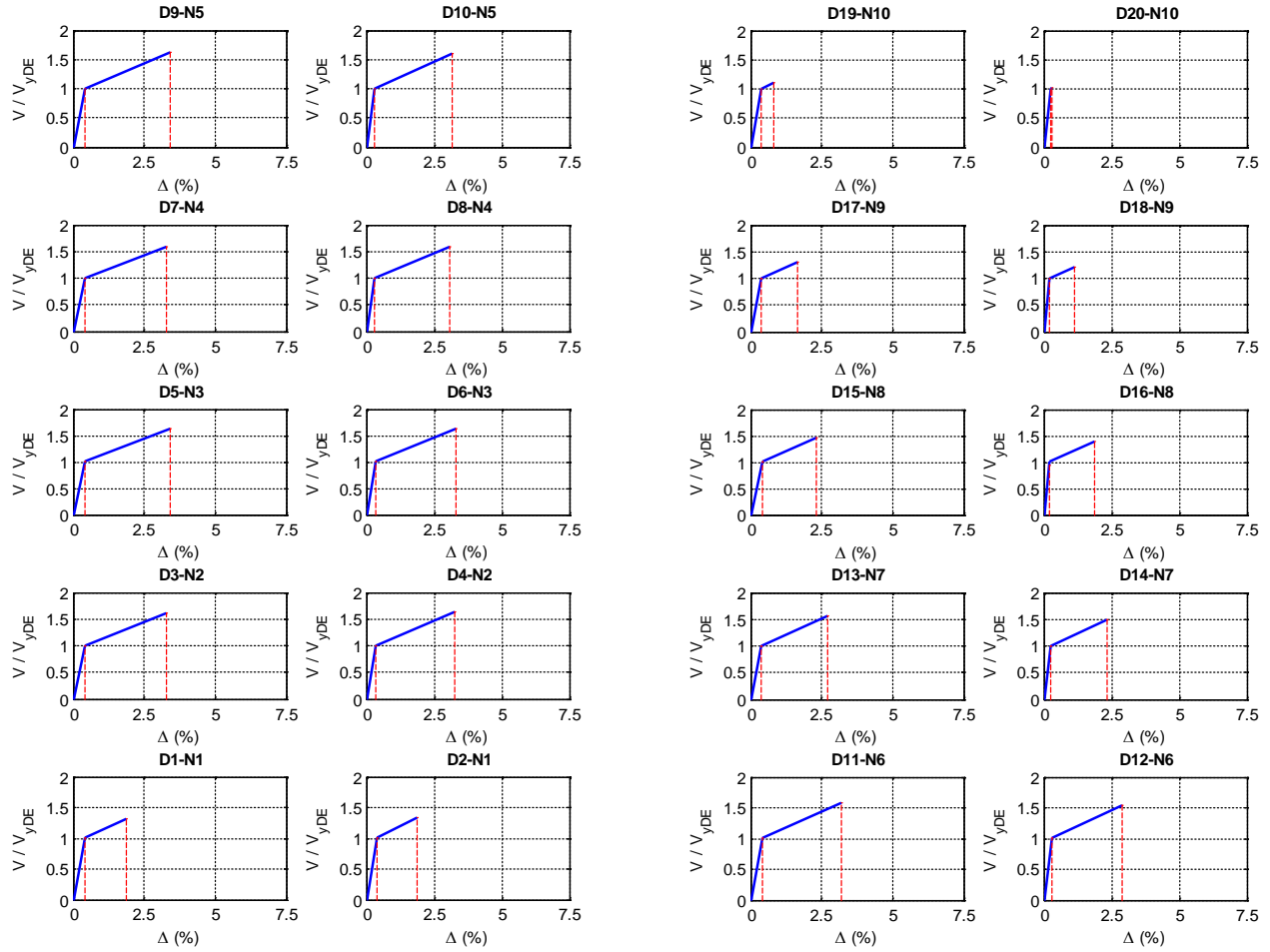


Figura A.48 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

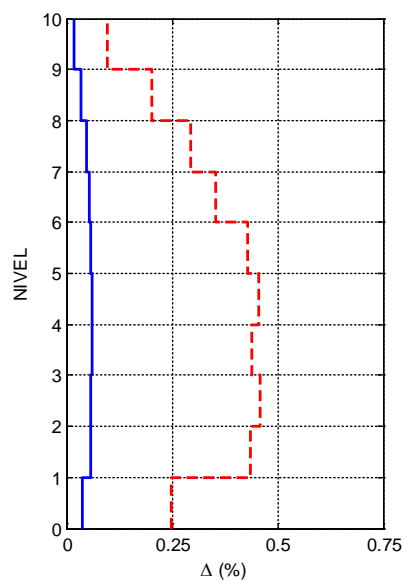
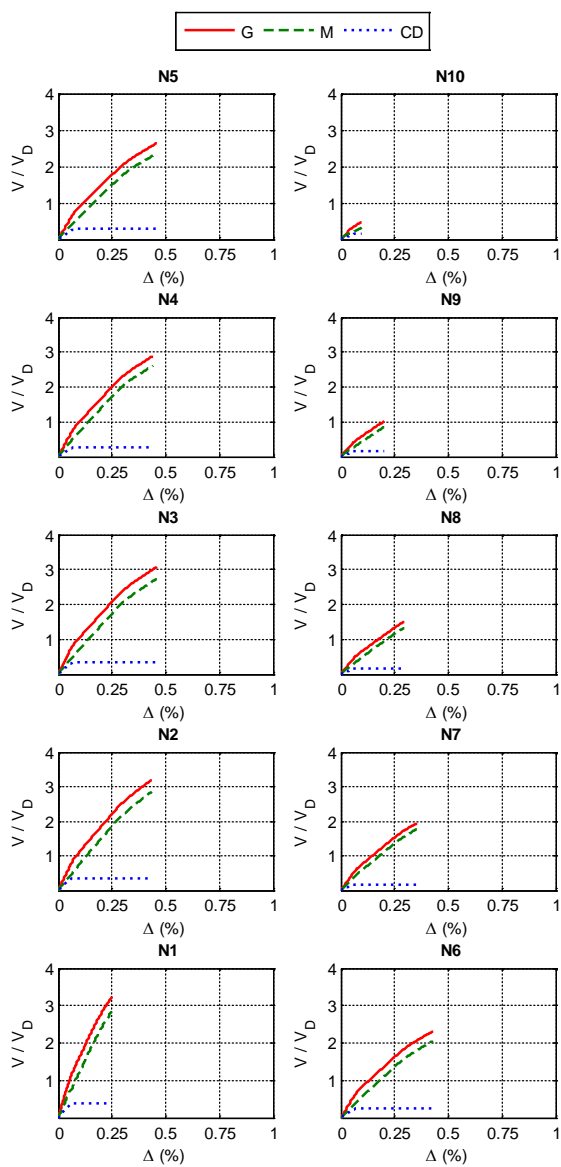
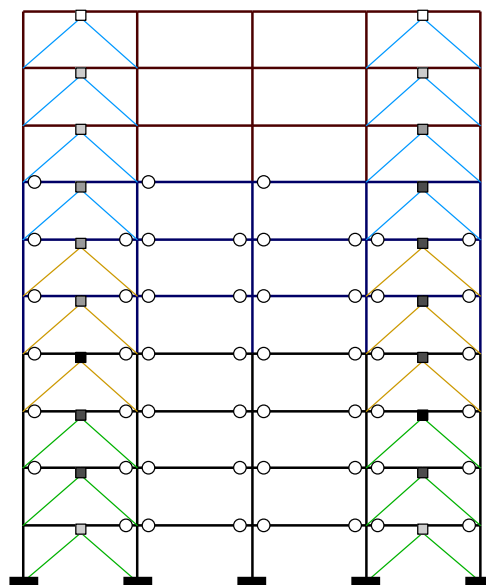
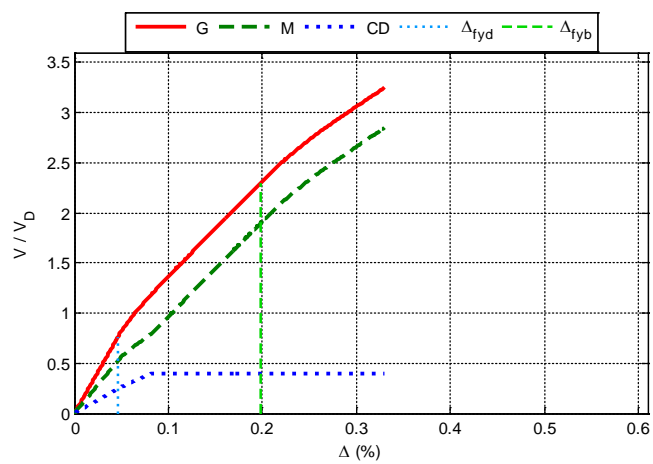


Figura A.49 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

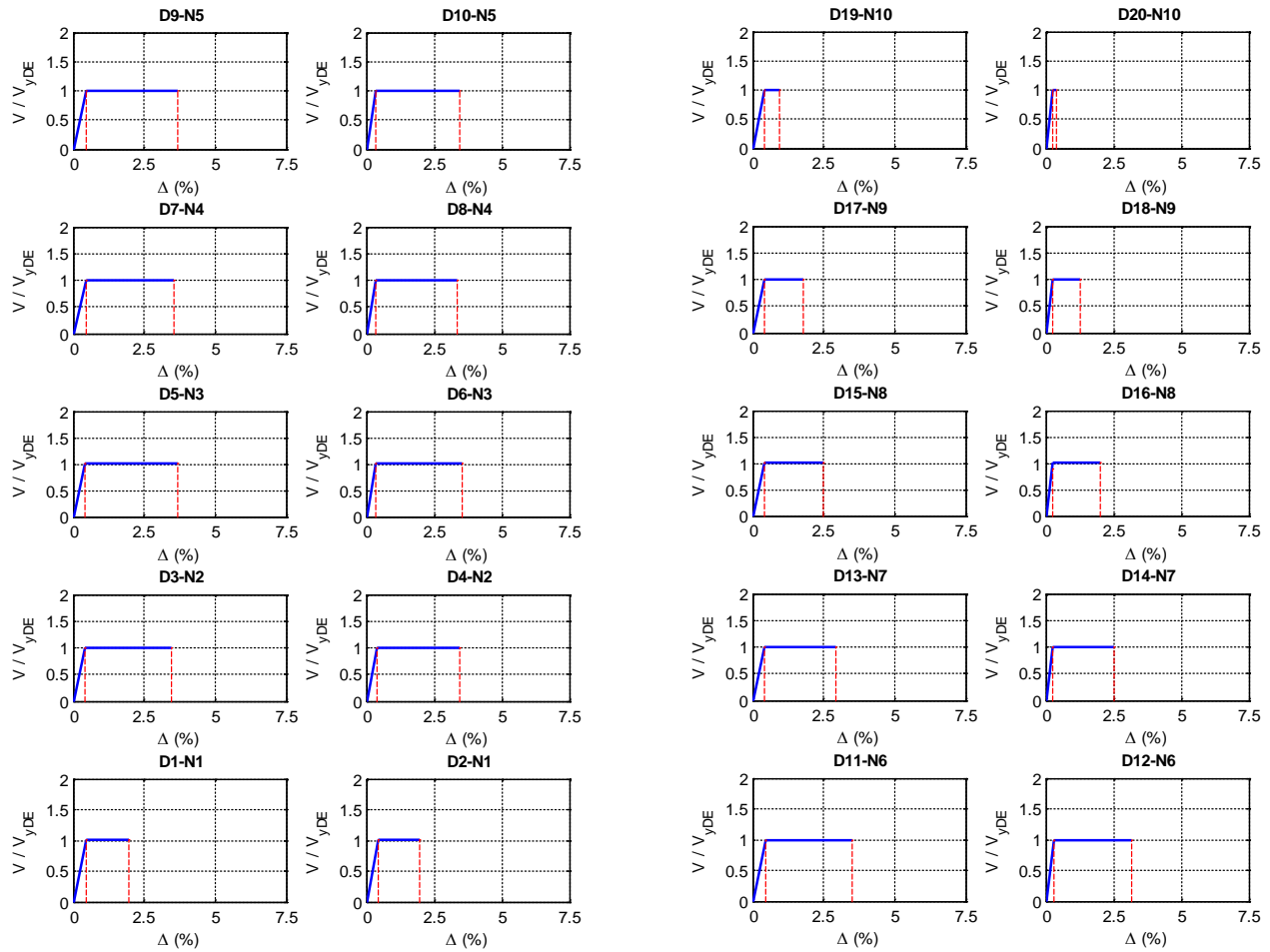


Figura A.50 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

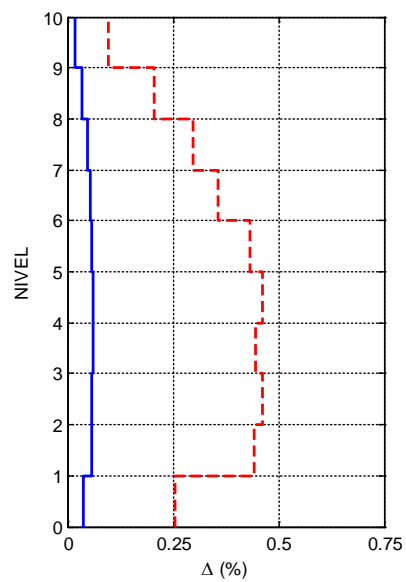
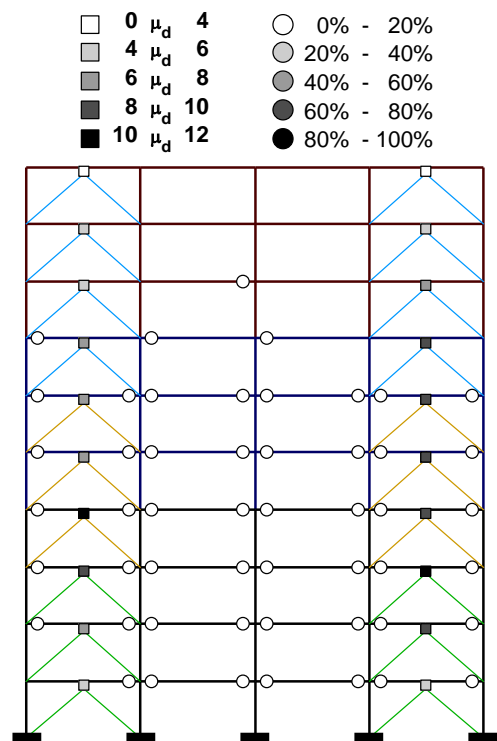
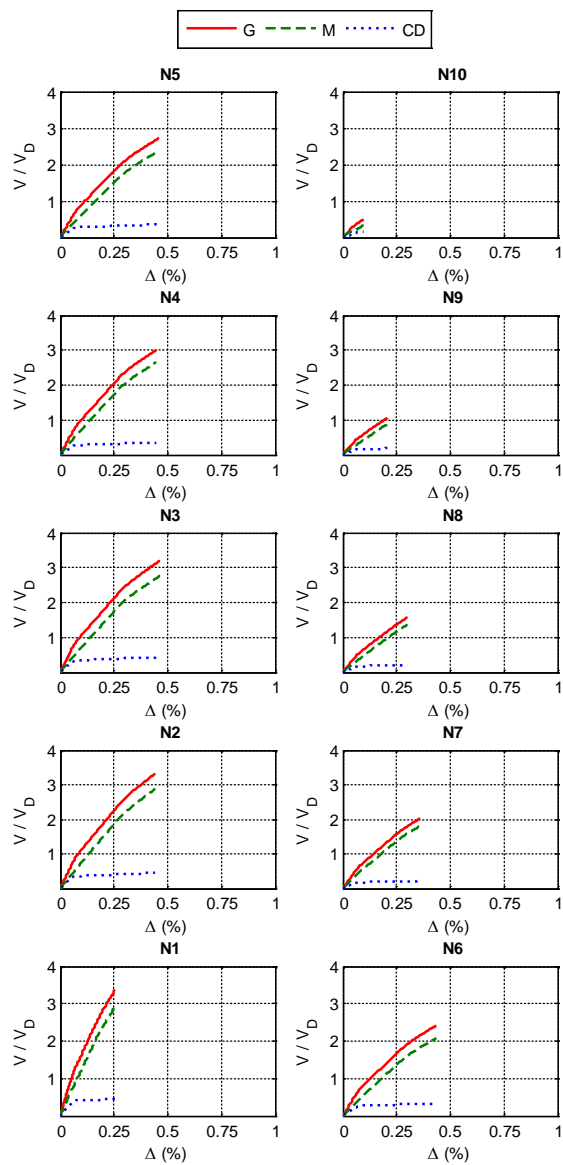
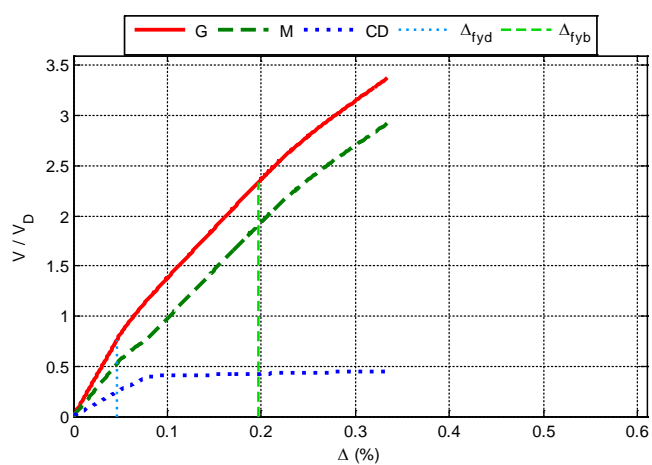


Figura A.51 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

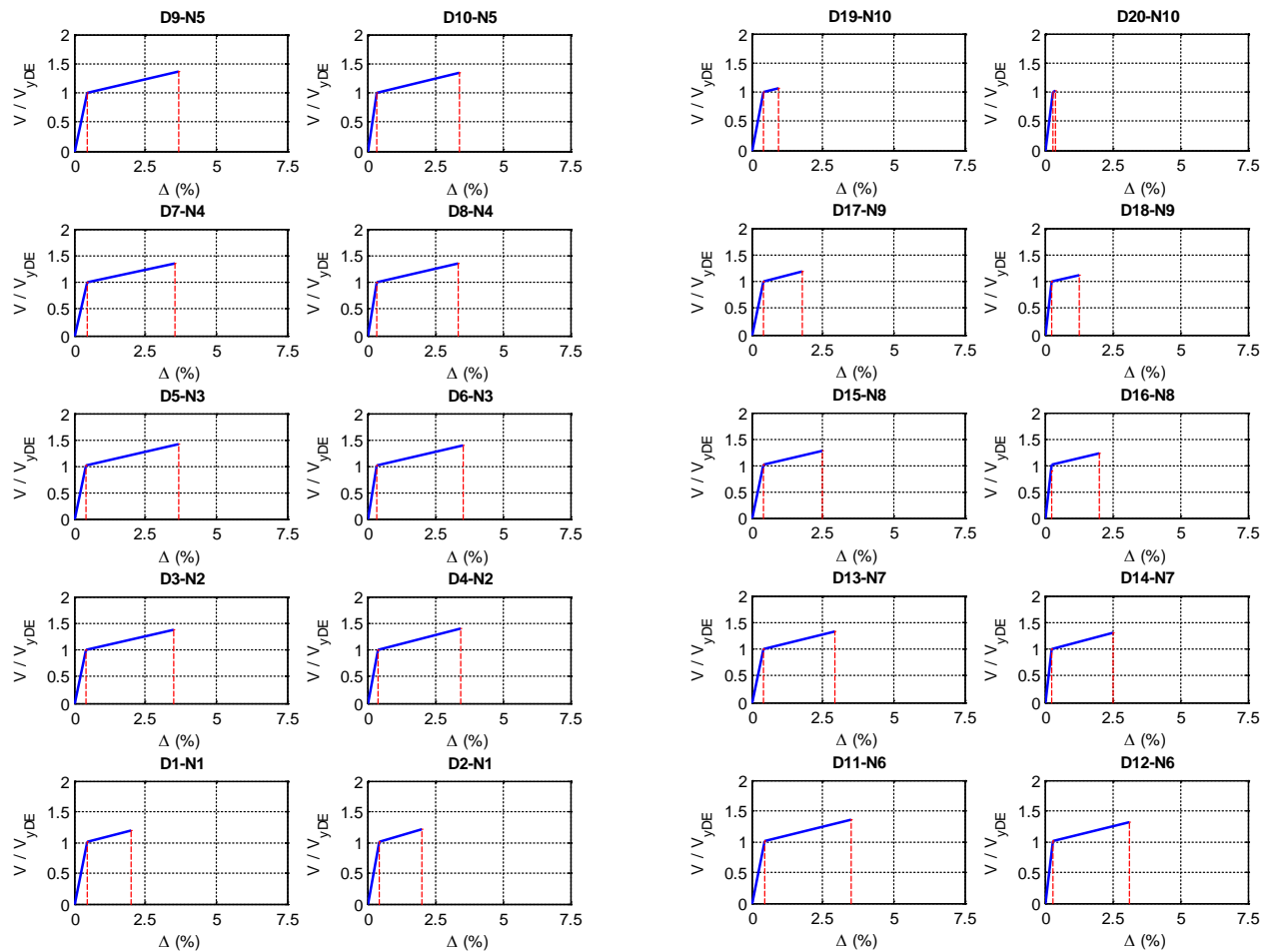


Figura A.52 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

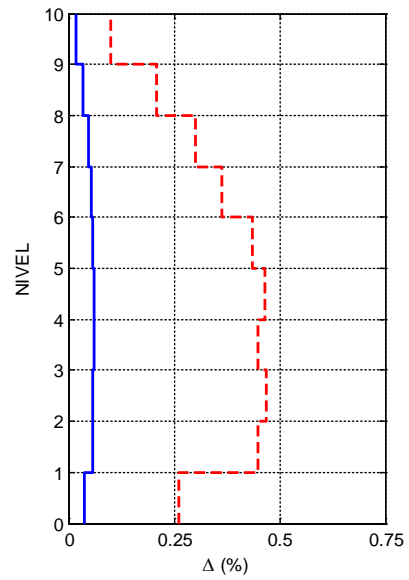
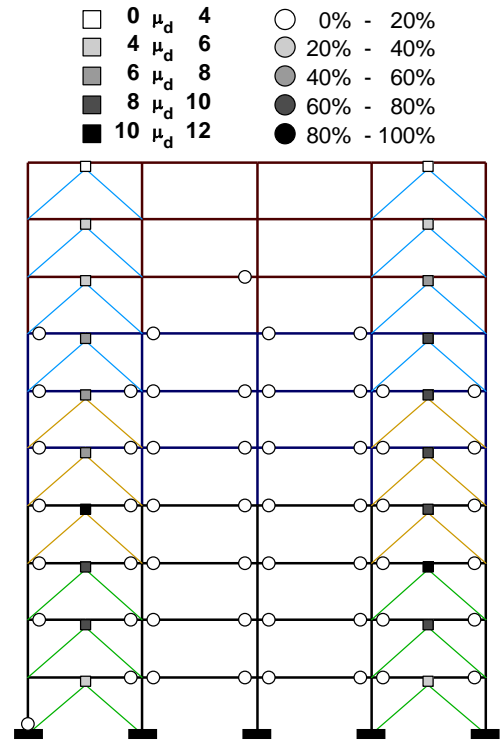
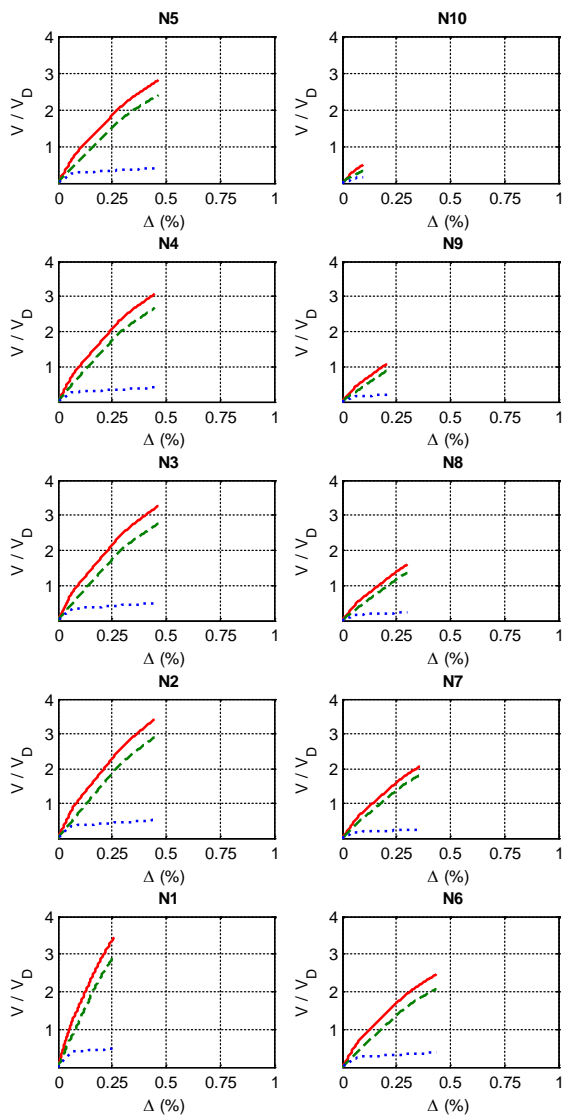
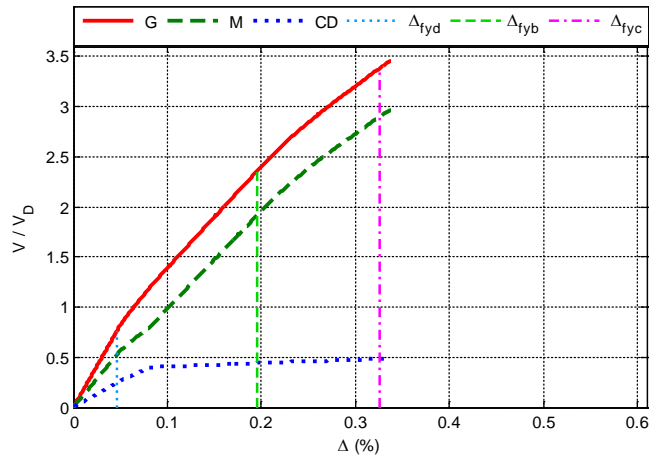


Figura A.53 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

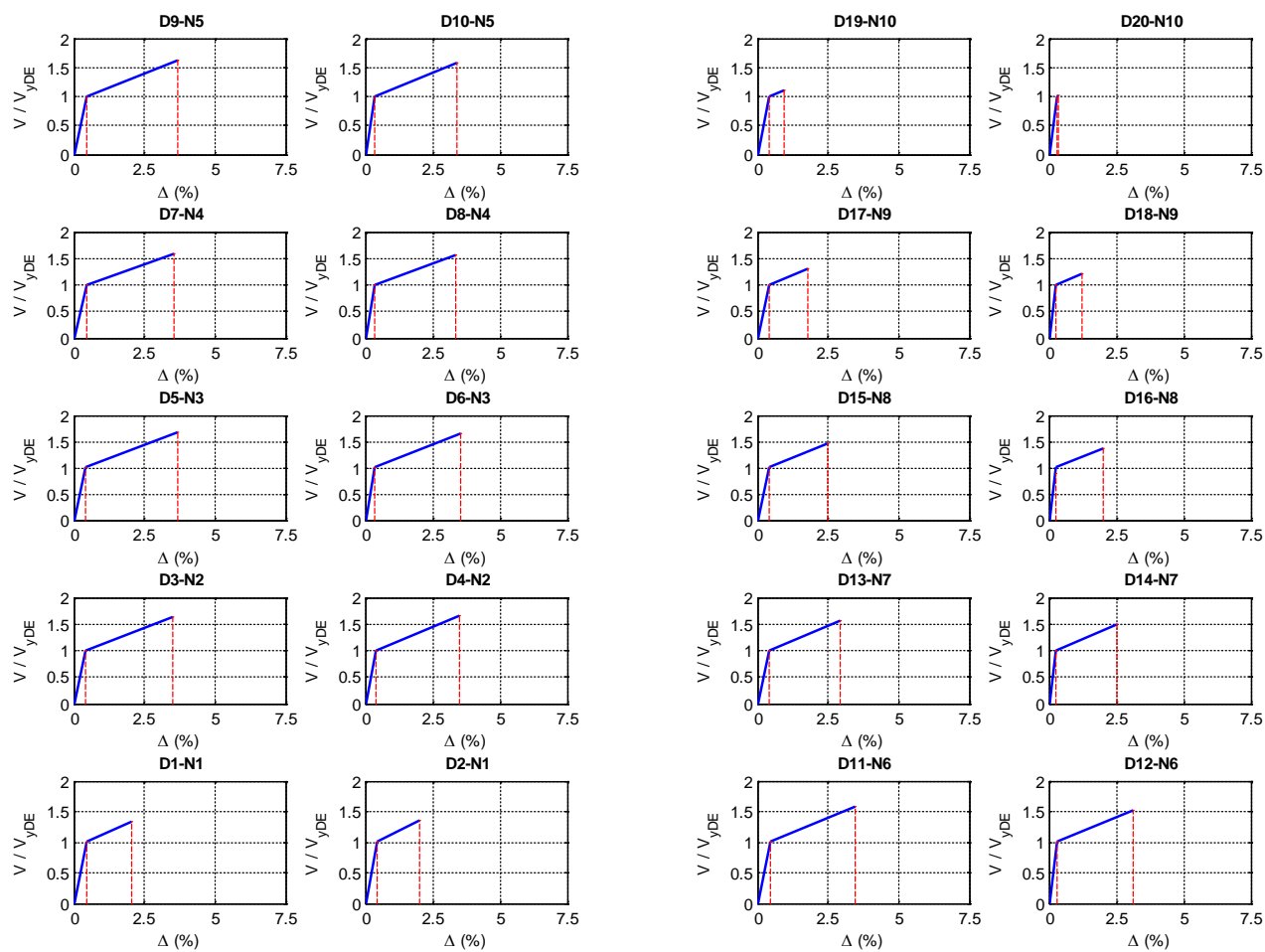


Figura A.54 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

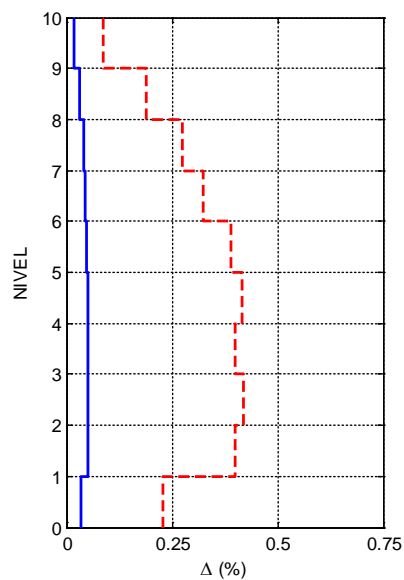
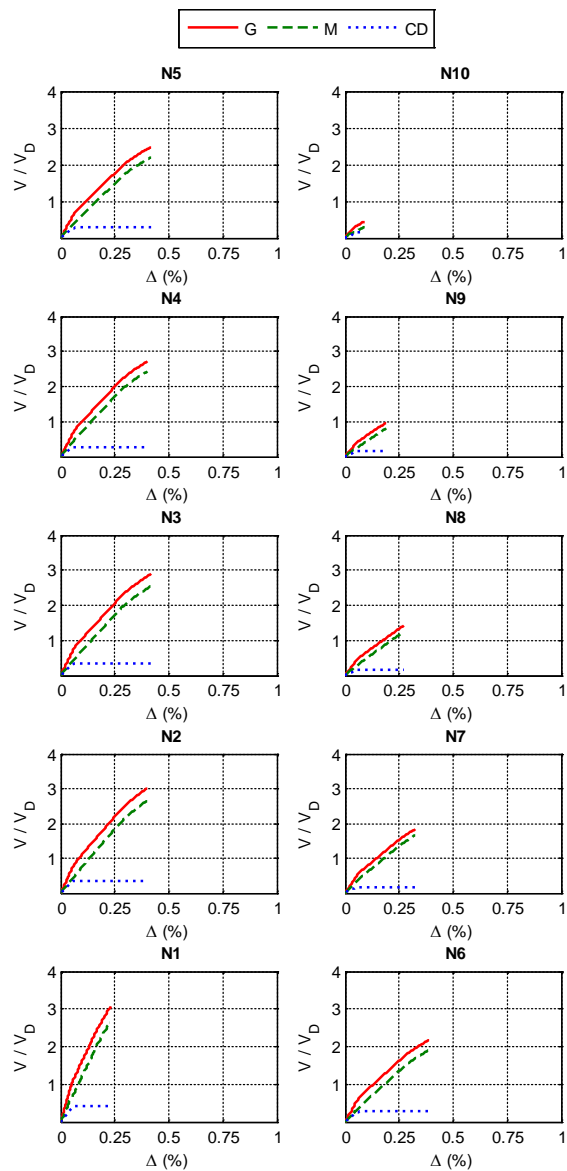
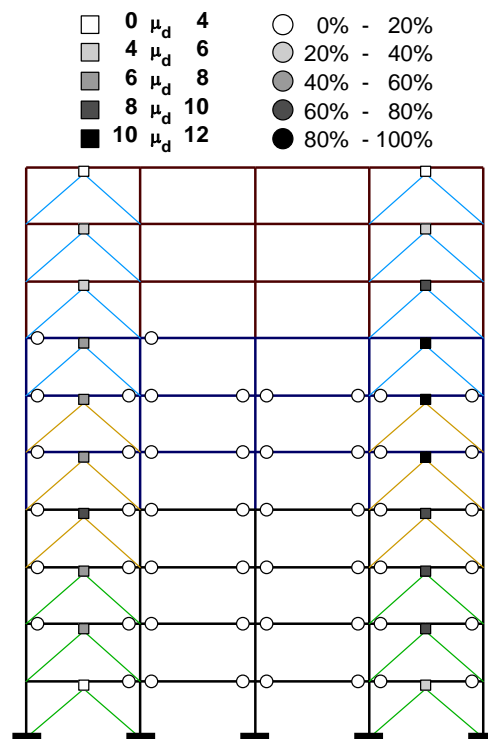
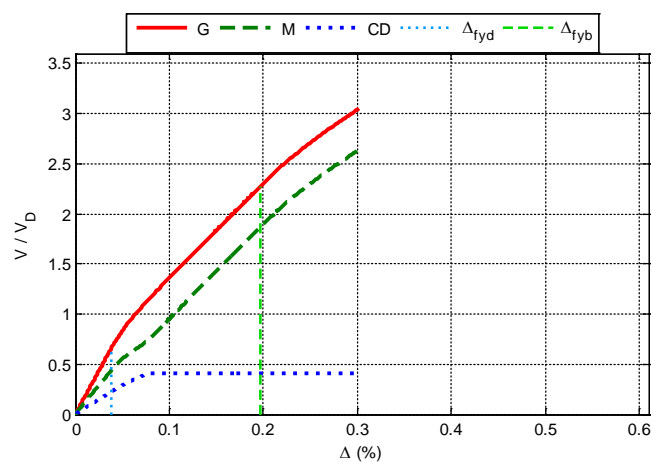


Figura A.55 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

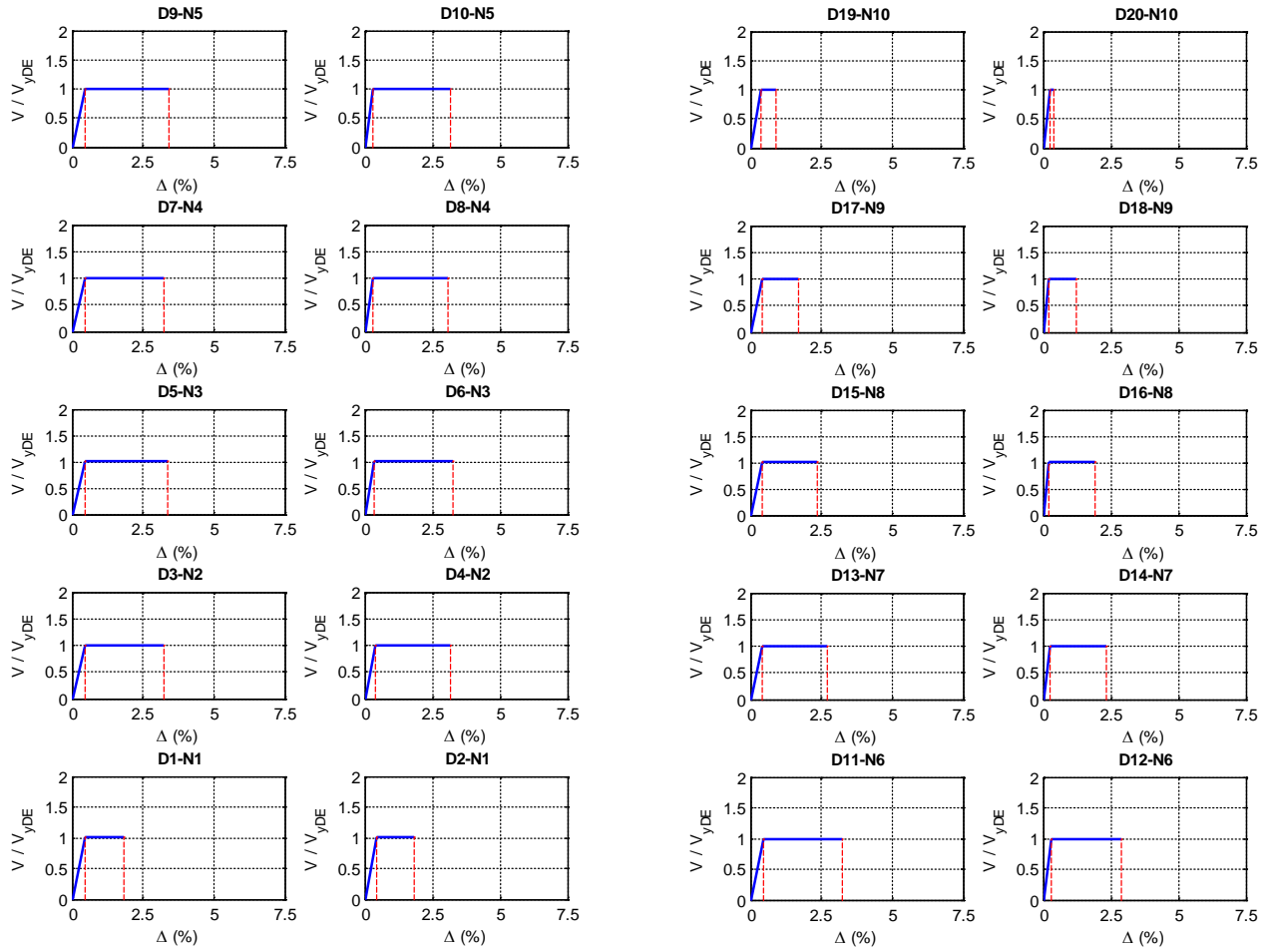


Figura A.56 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

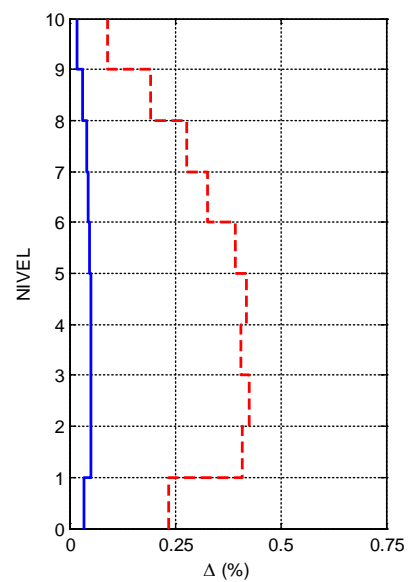
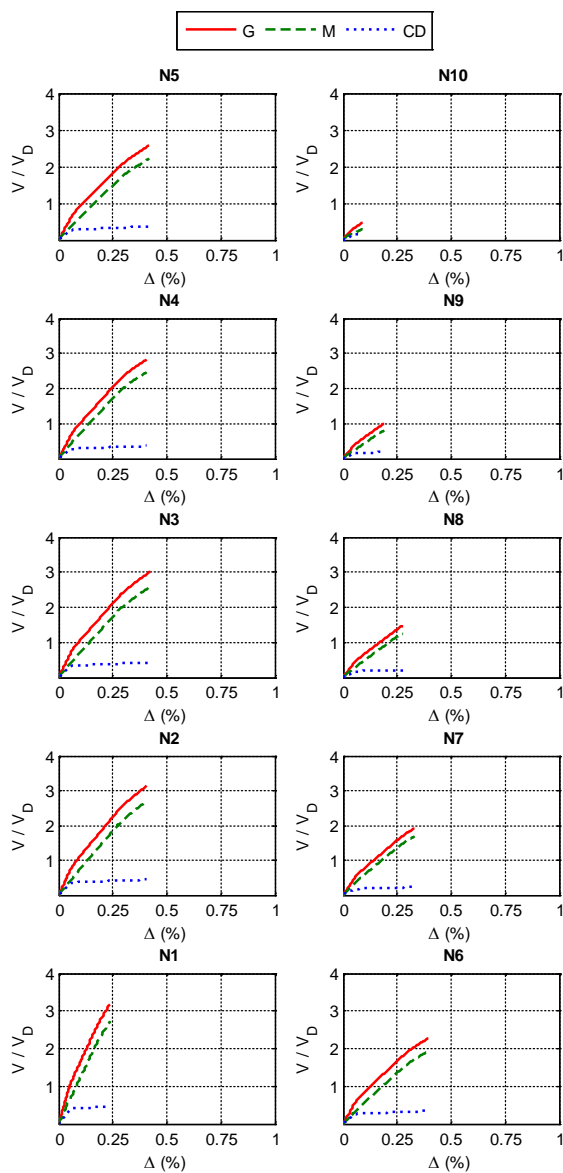
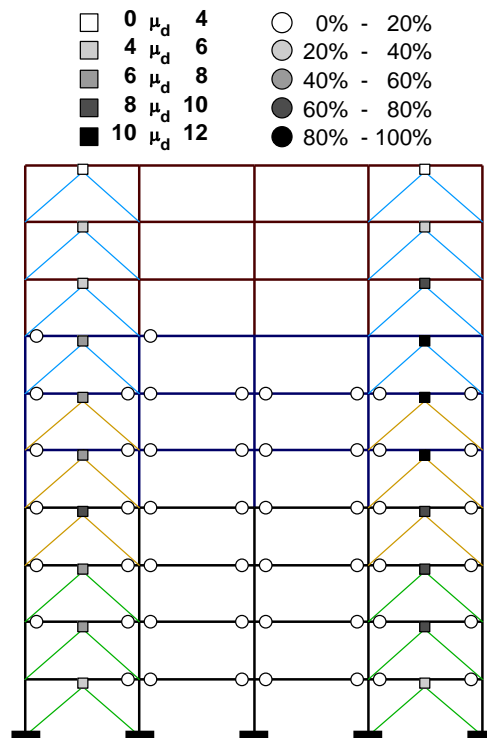
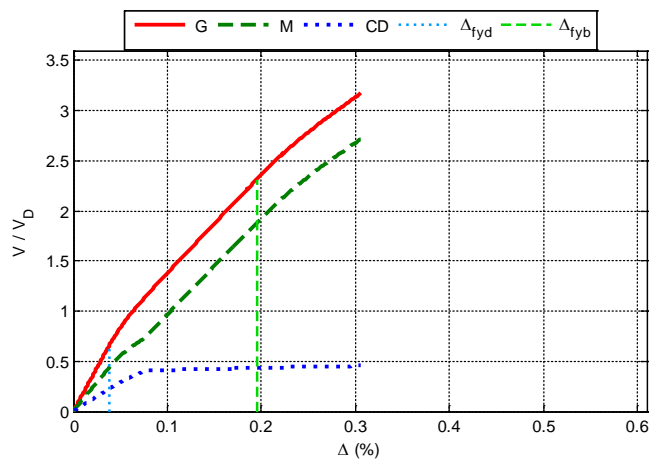


Figura A.57 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

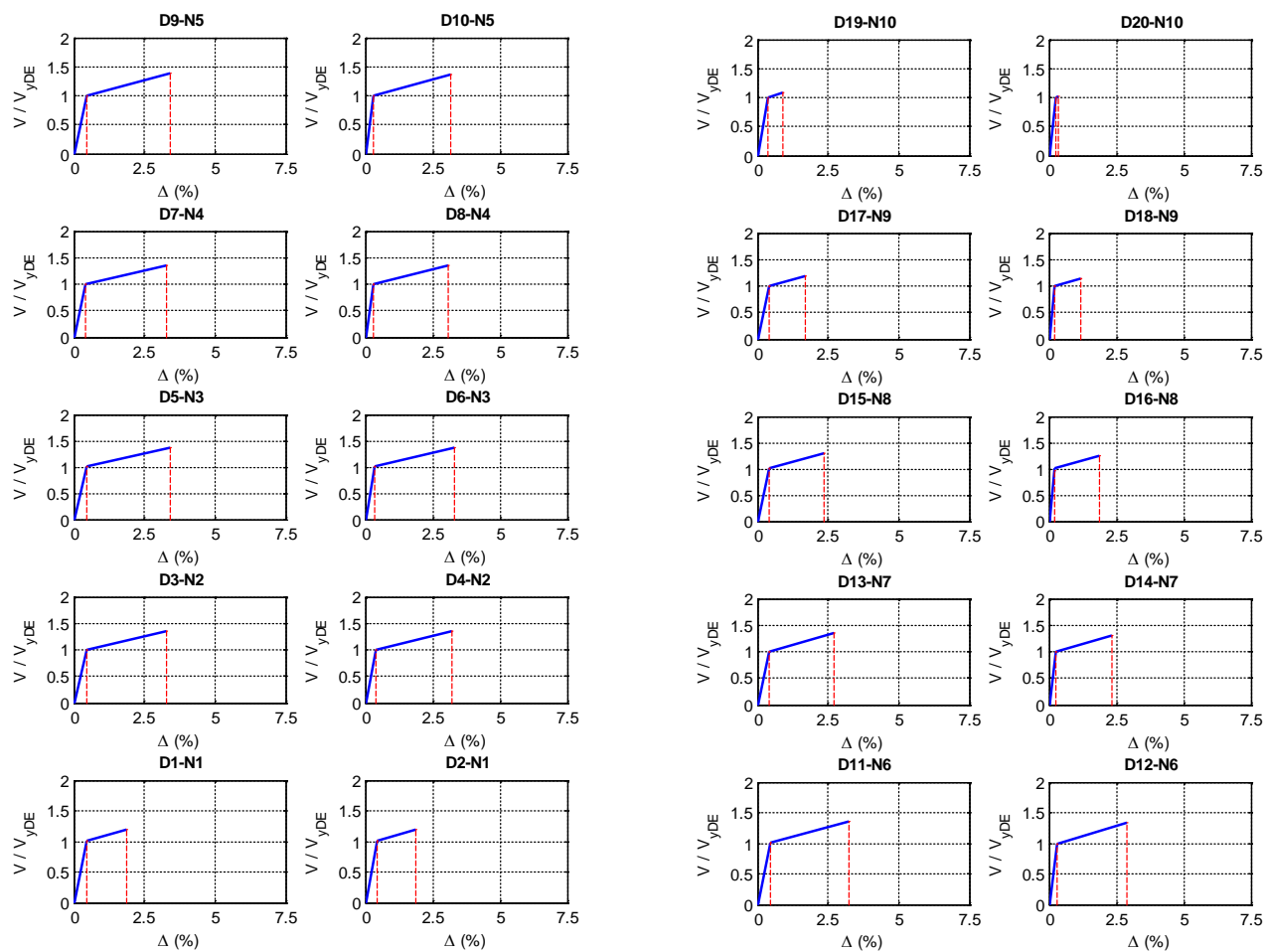


Figura A.58 $N = 10$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

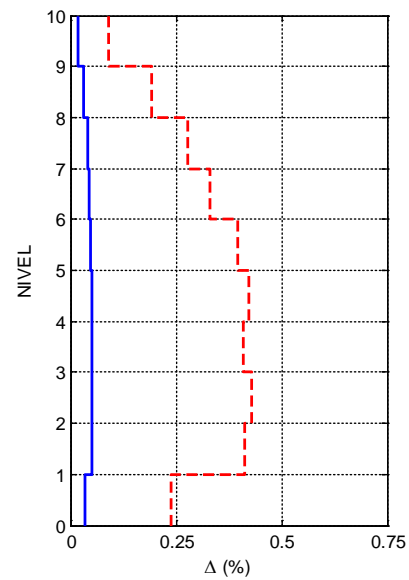
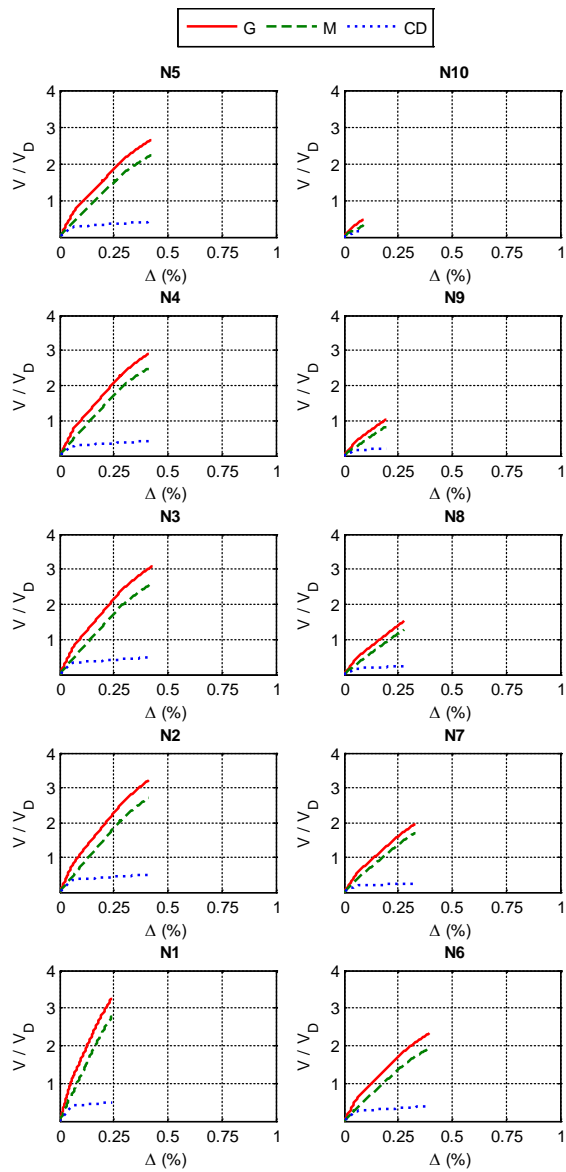
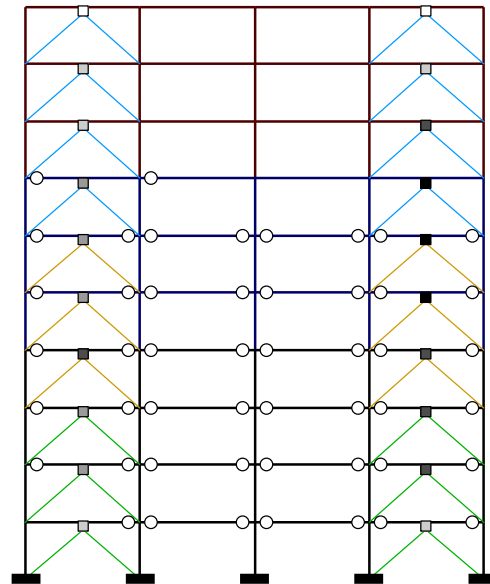
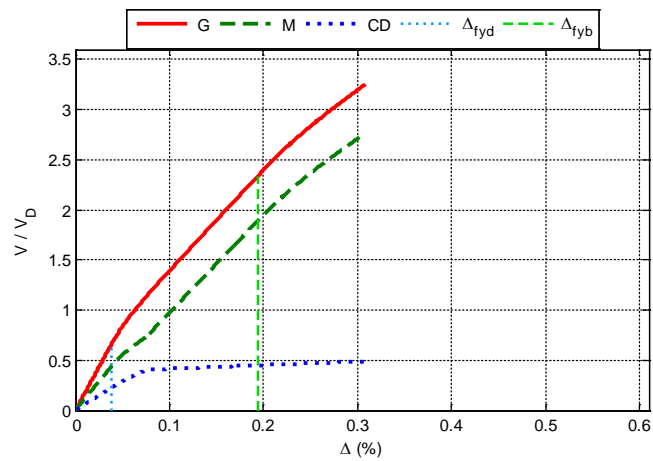


Figura A.59 $N = 10$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

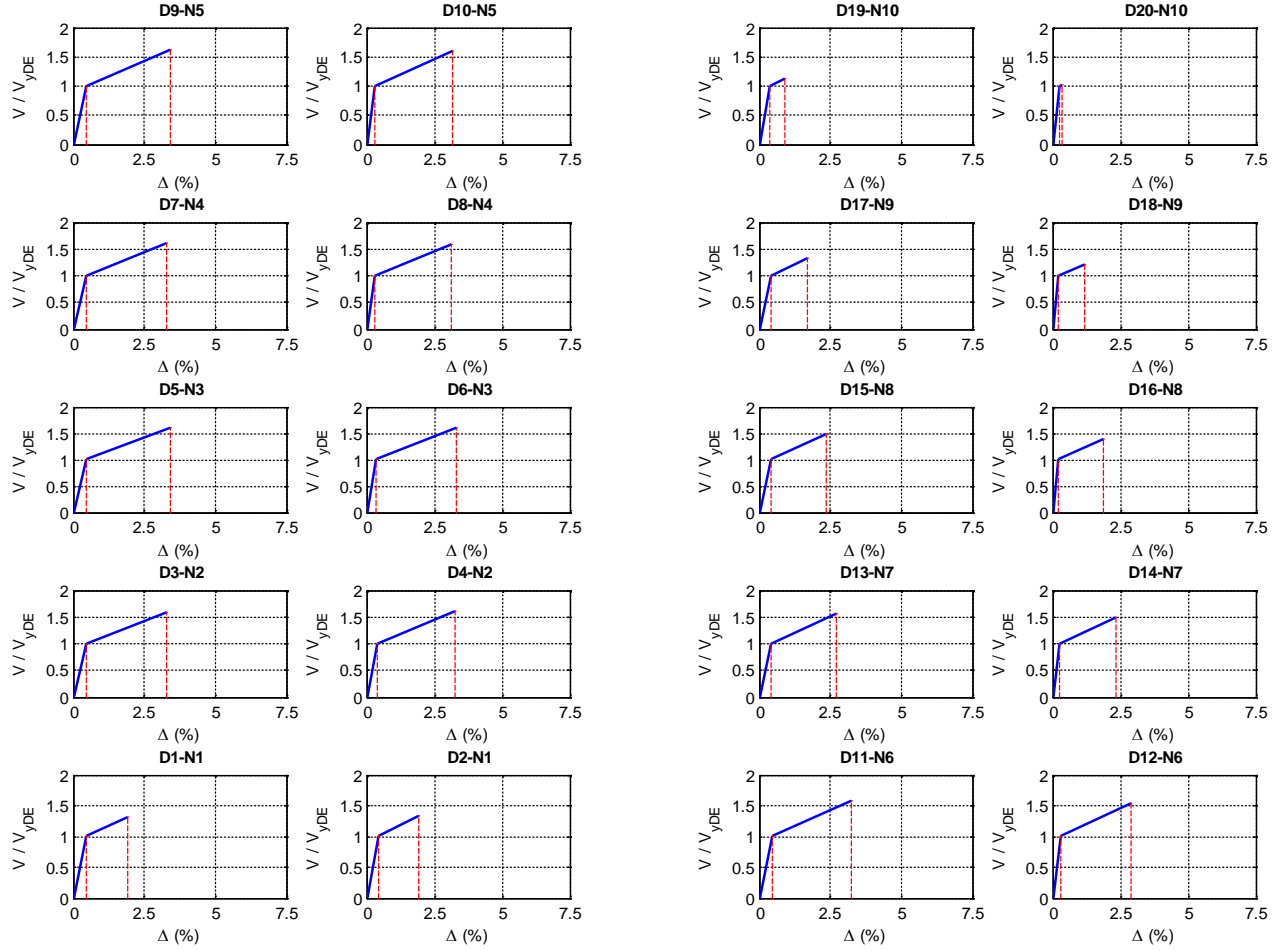


Figura A.60 $N = 10, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

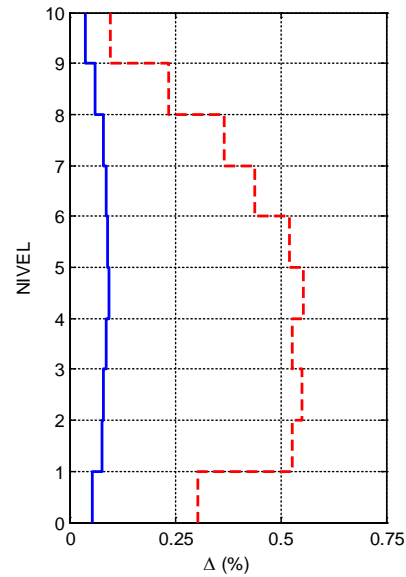
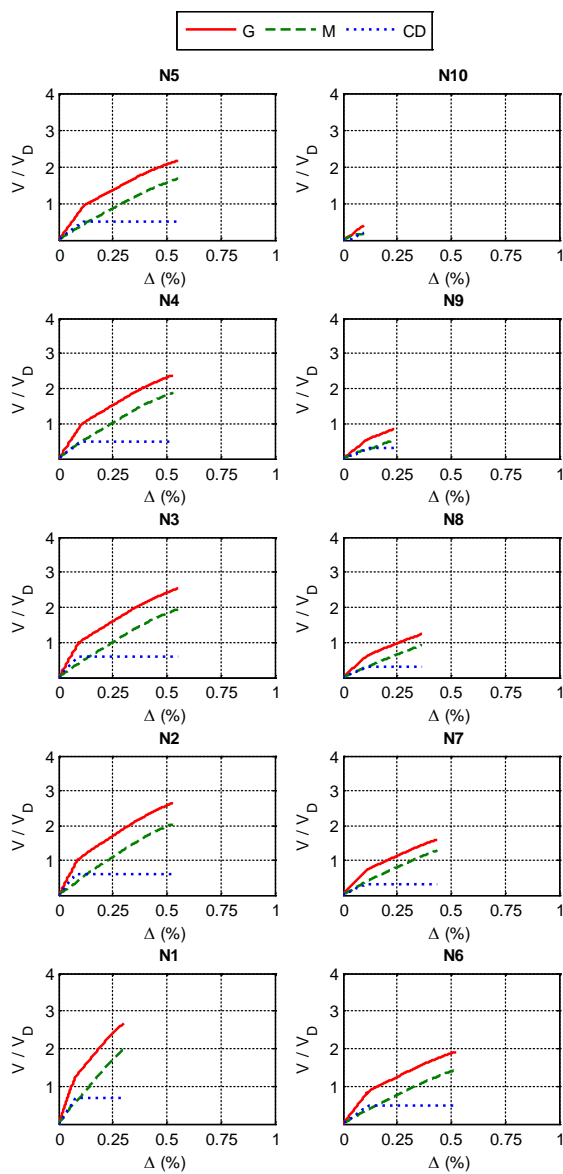
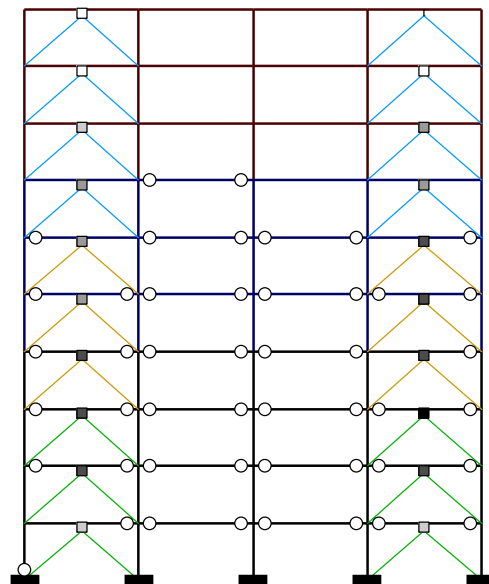
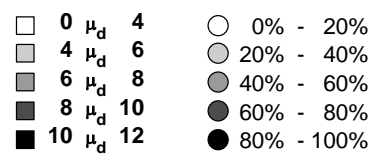
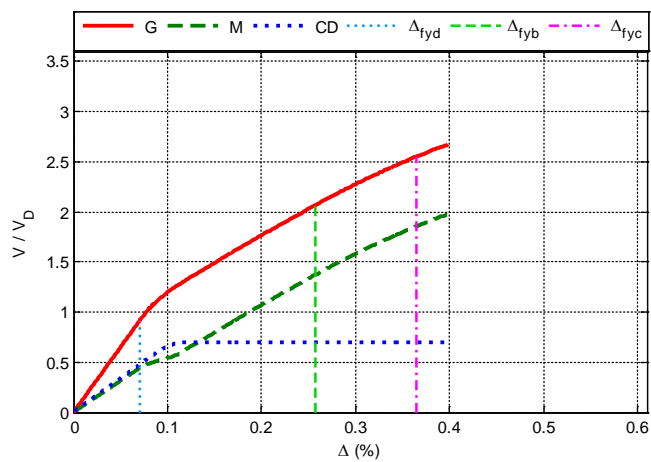


Figura A.61 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

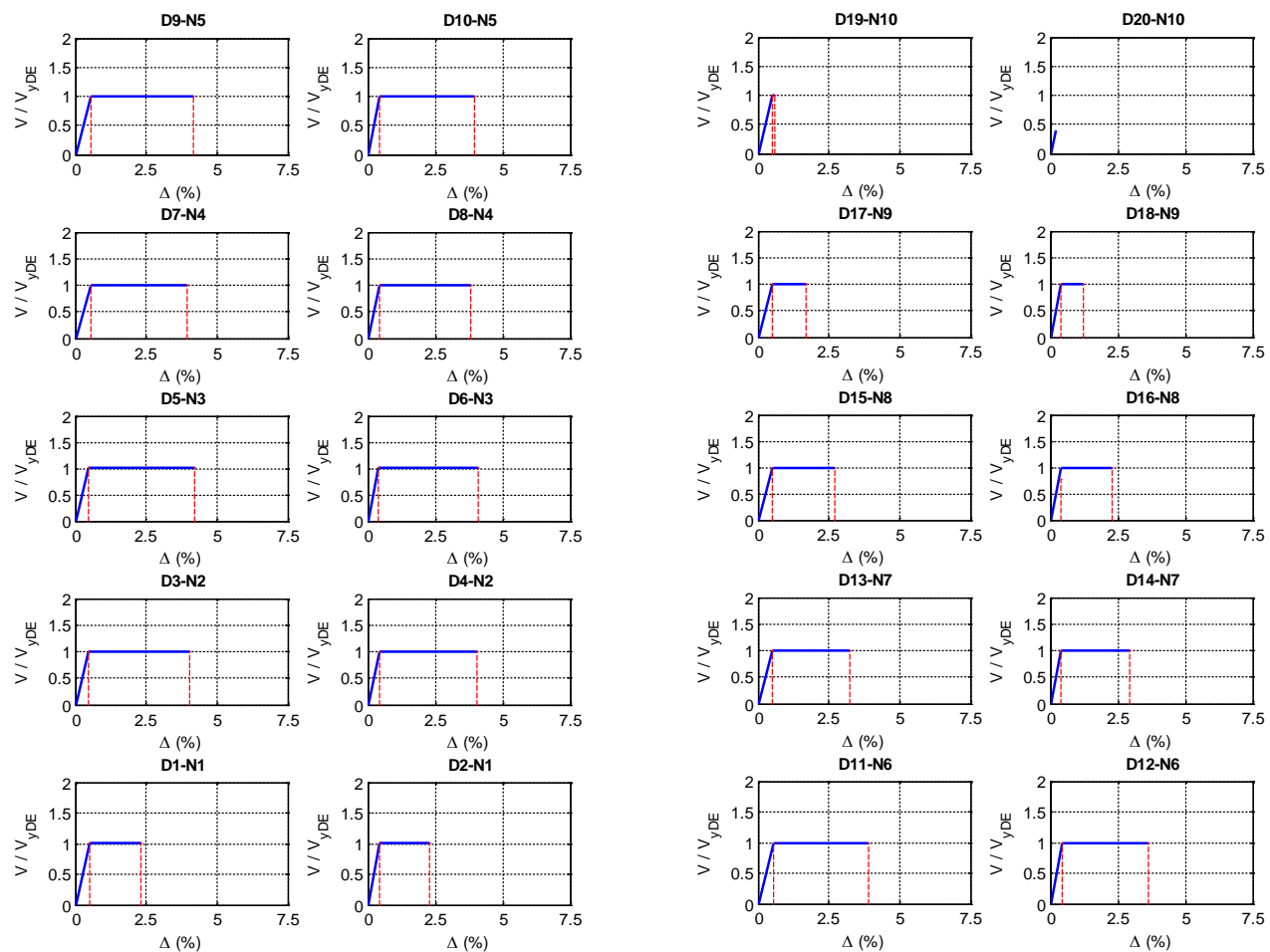


Figura A.62 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

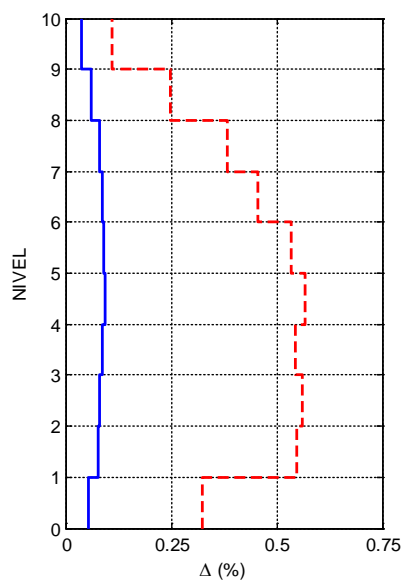
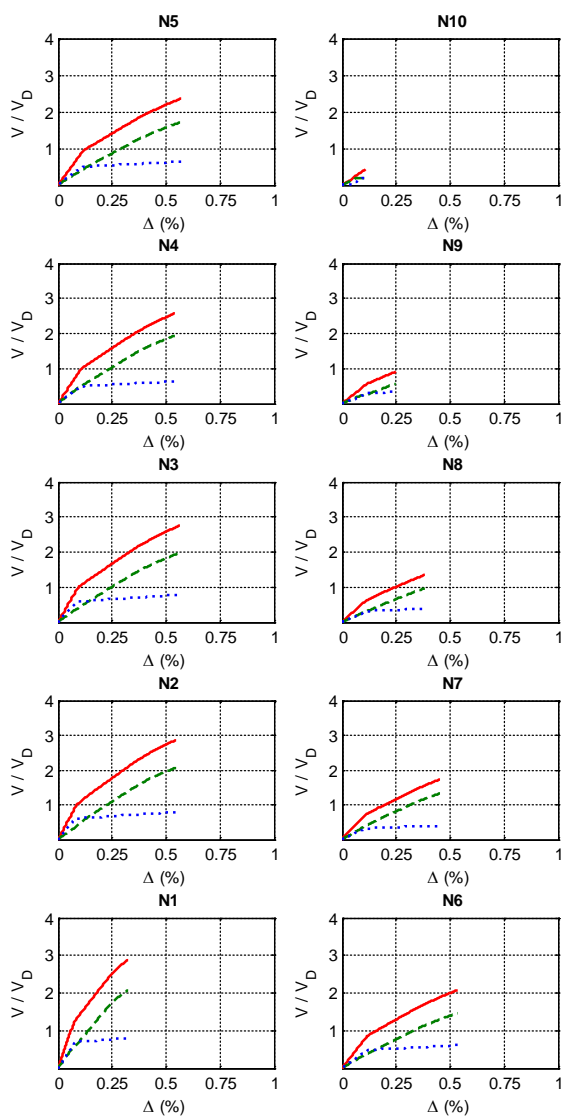
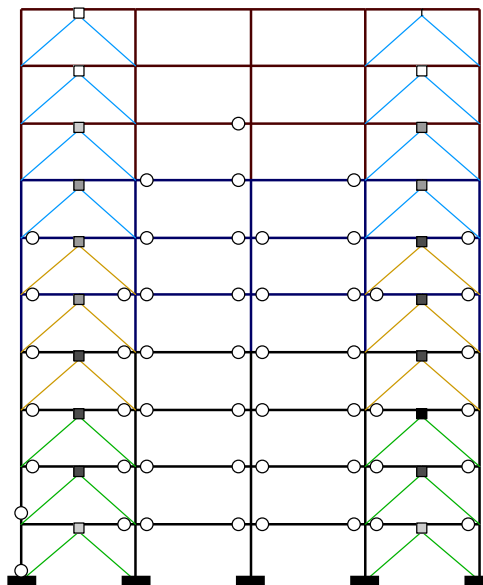
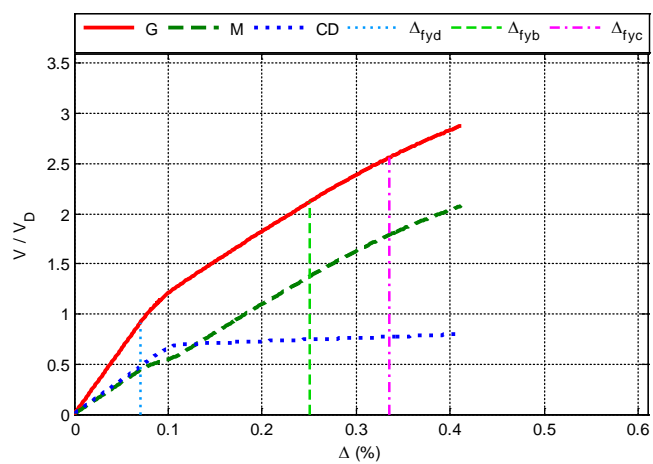


Figura A.63 $N = 10$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

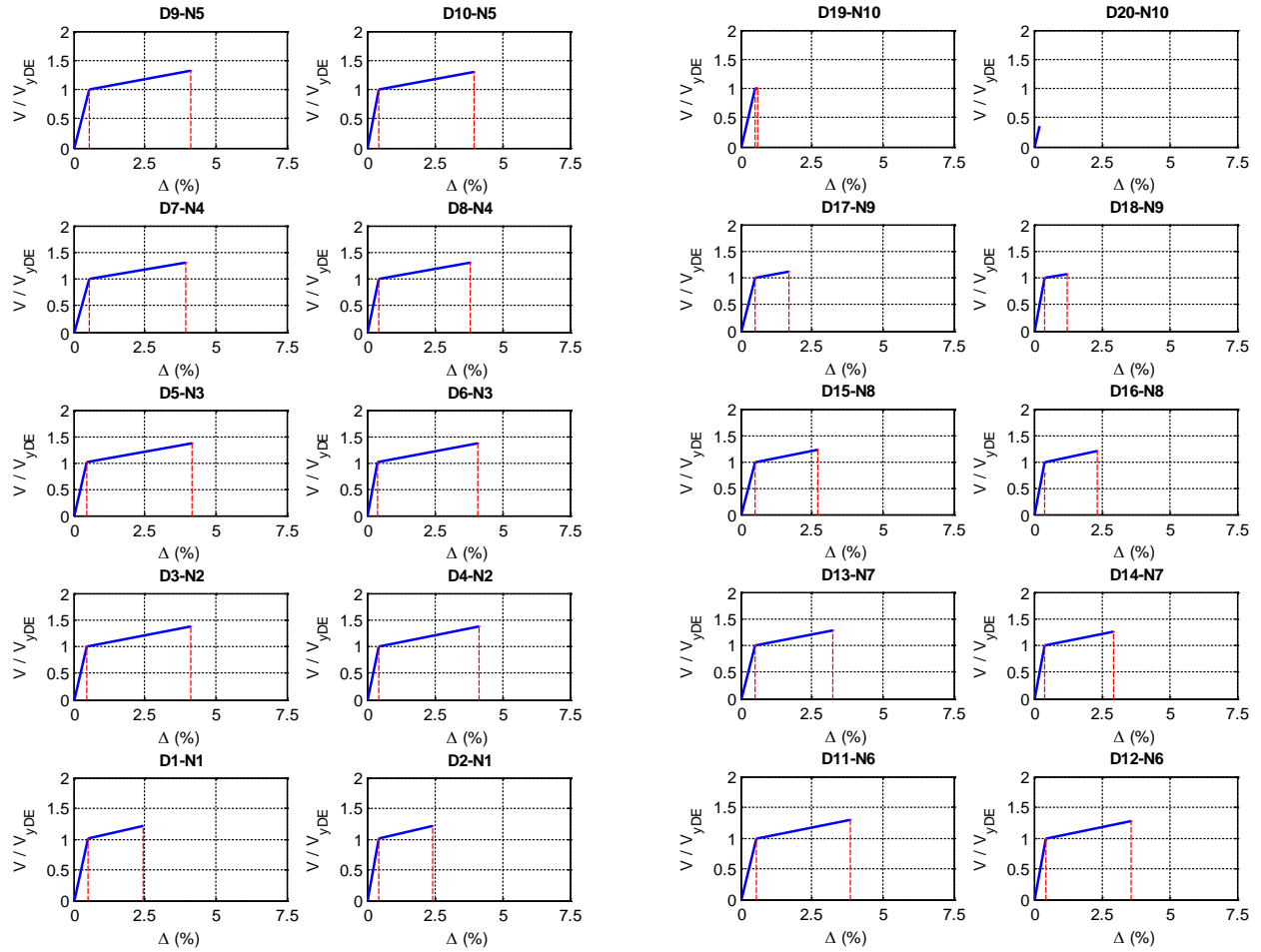


Figura A.64 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

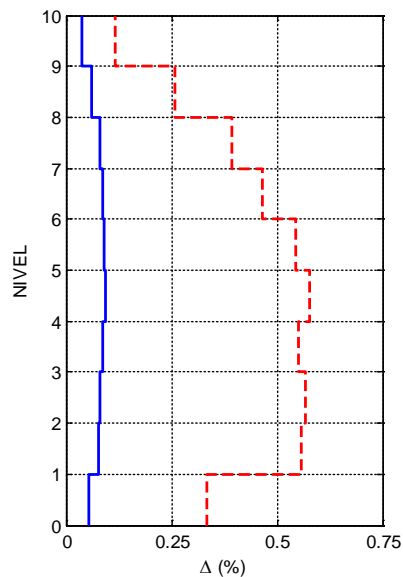
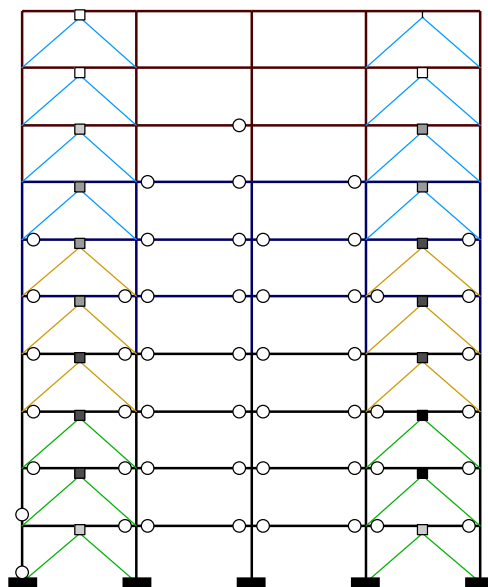
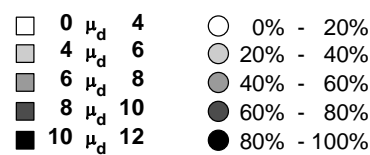
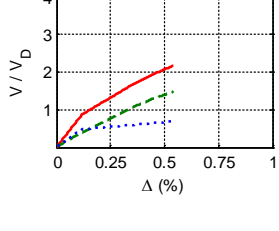
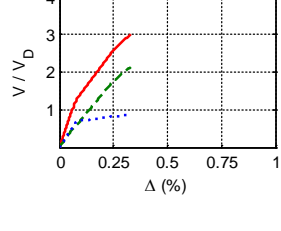
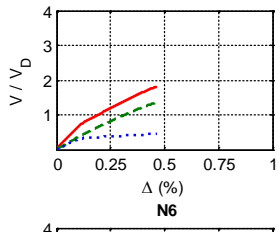
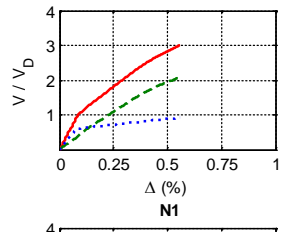
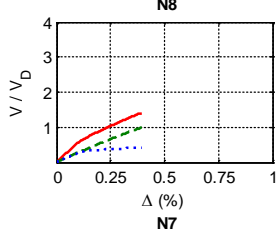
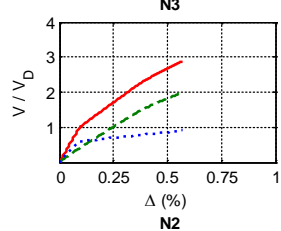
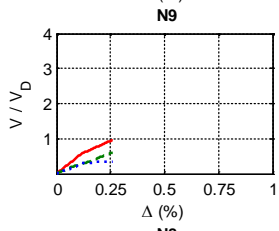
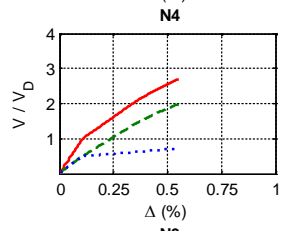
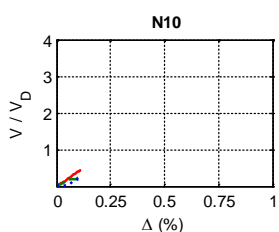
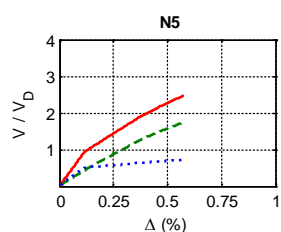
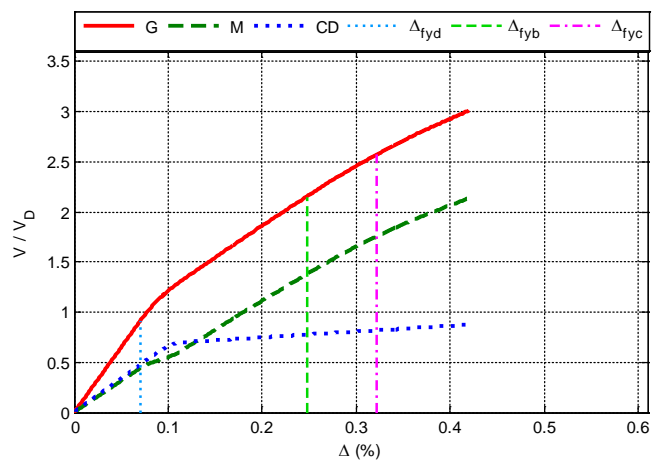


Figura A.65 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

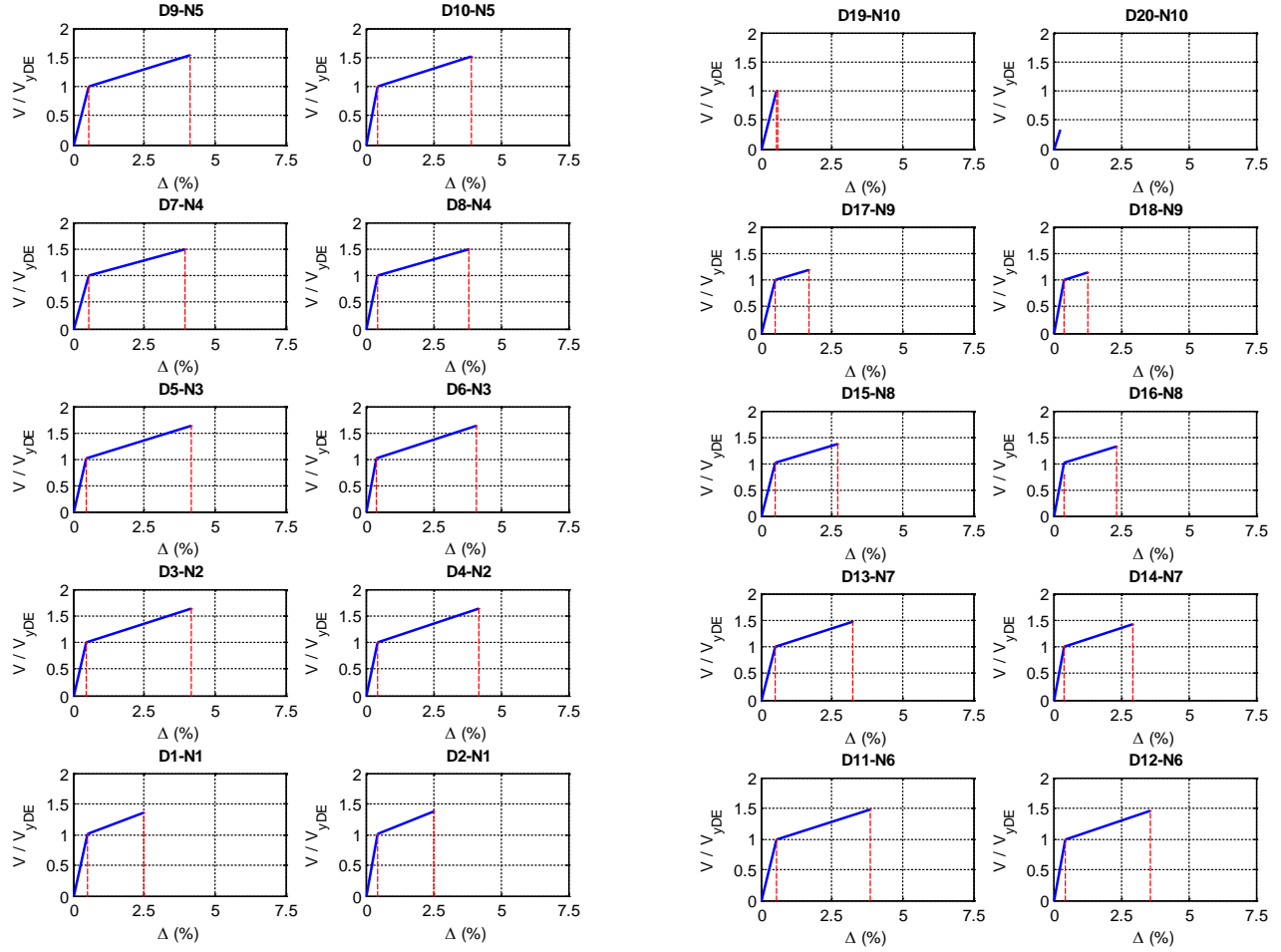


Figura A.66 $N = 10$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

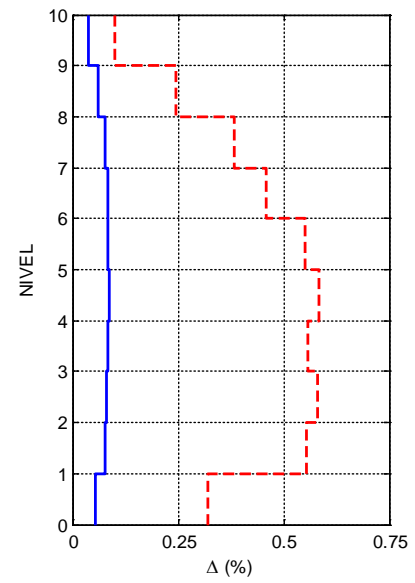
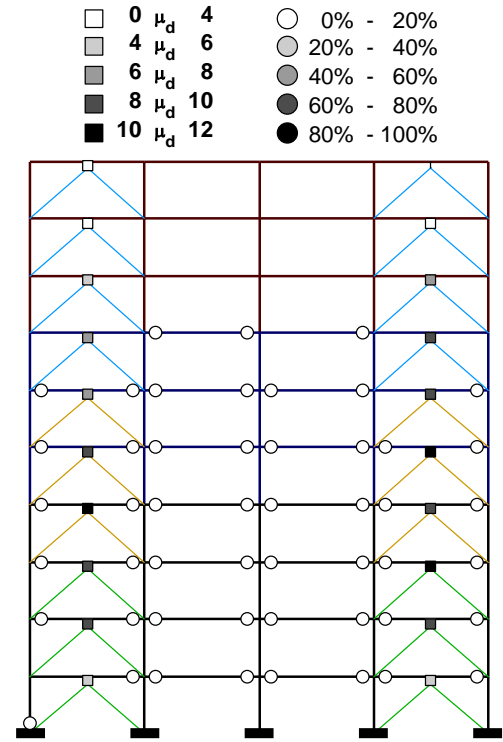
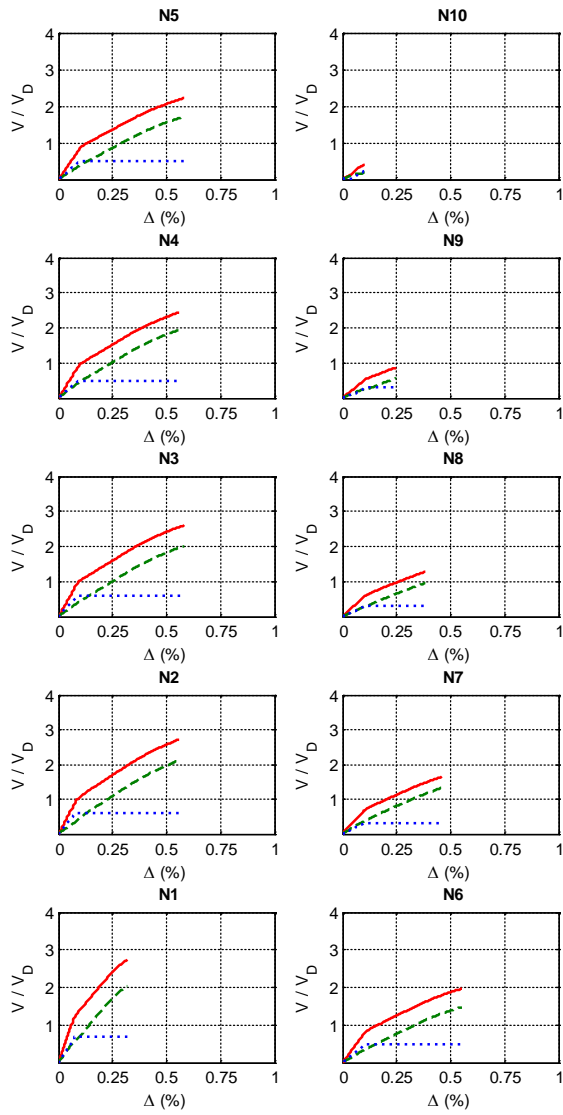
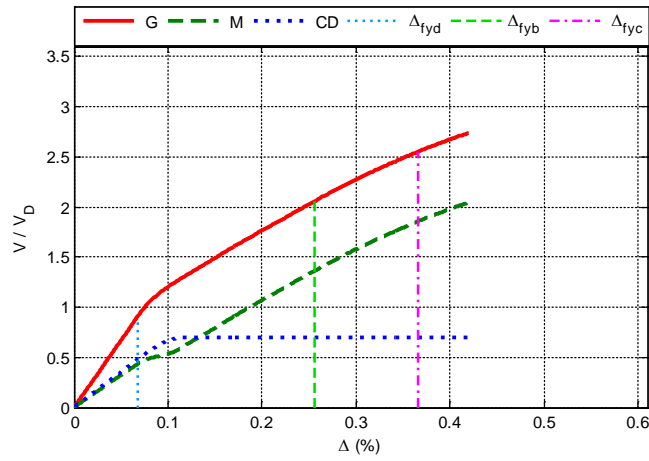


Figura A.67 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

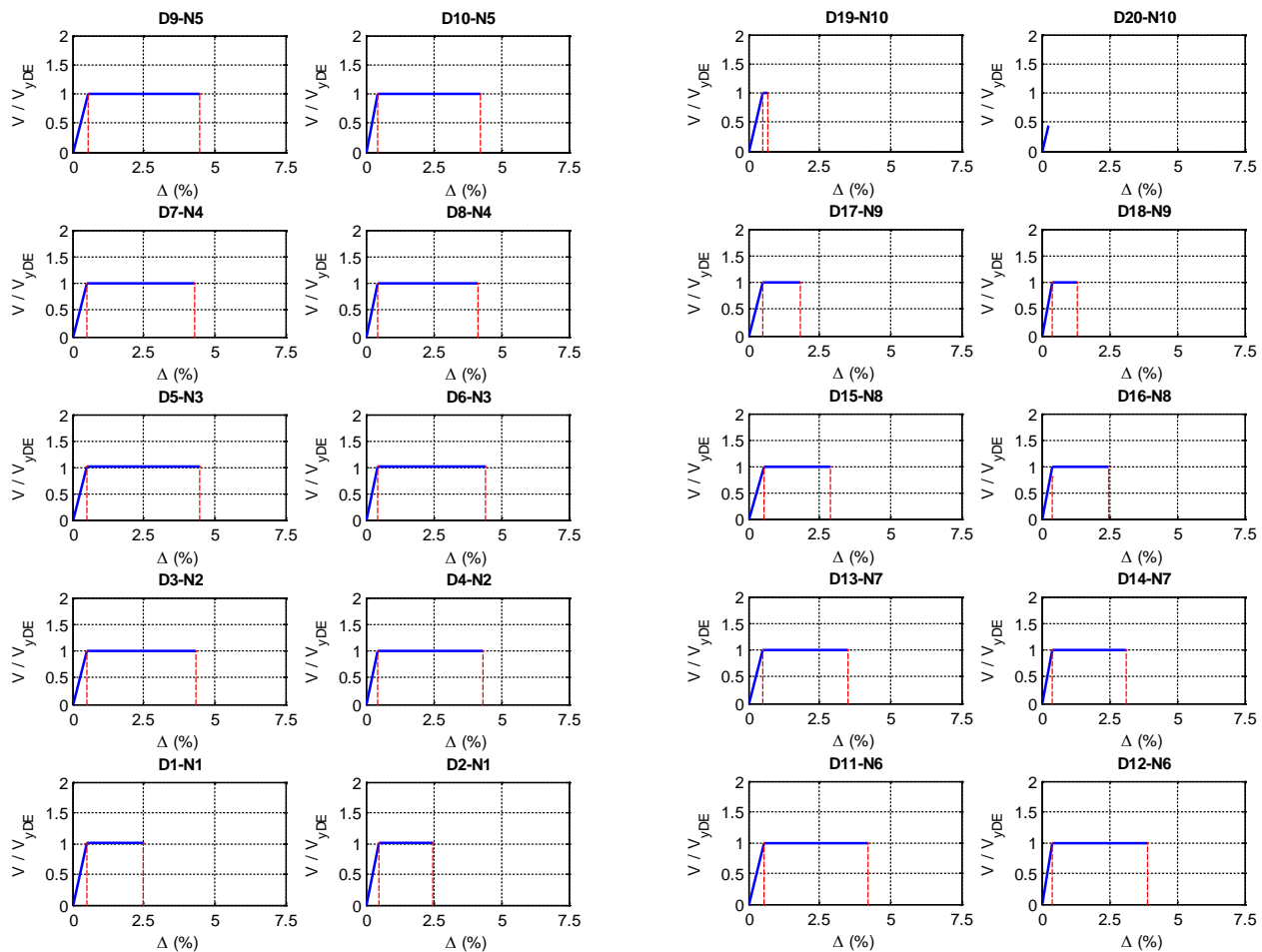
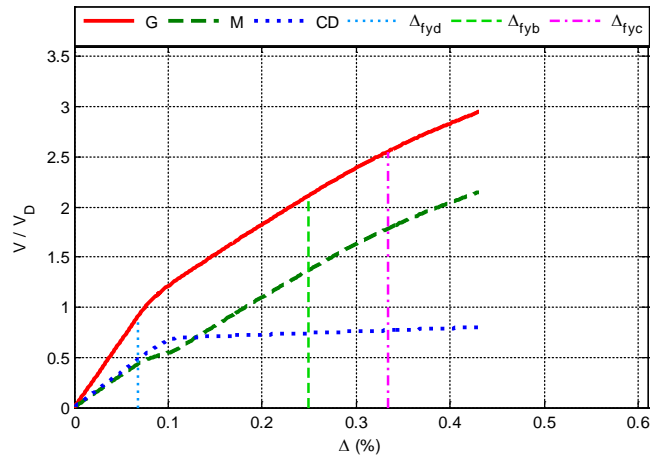


Figura A.68 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$



— G — M ... CD

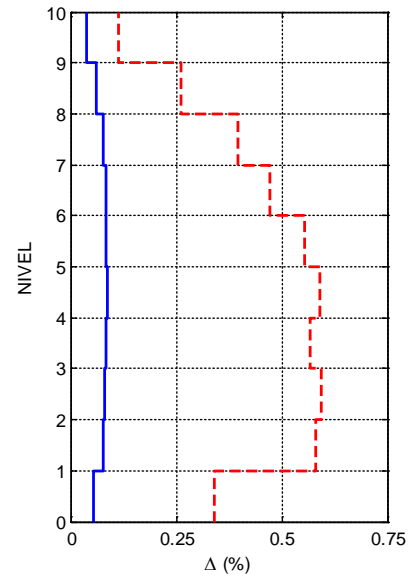
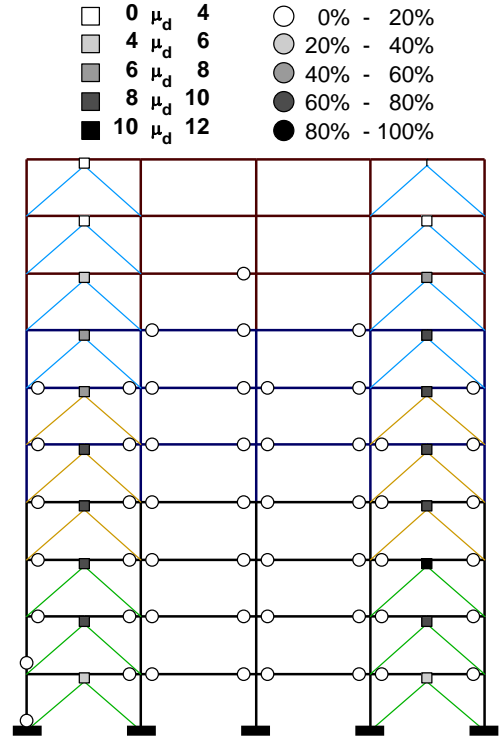
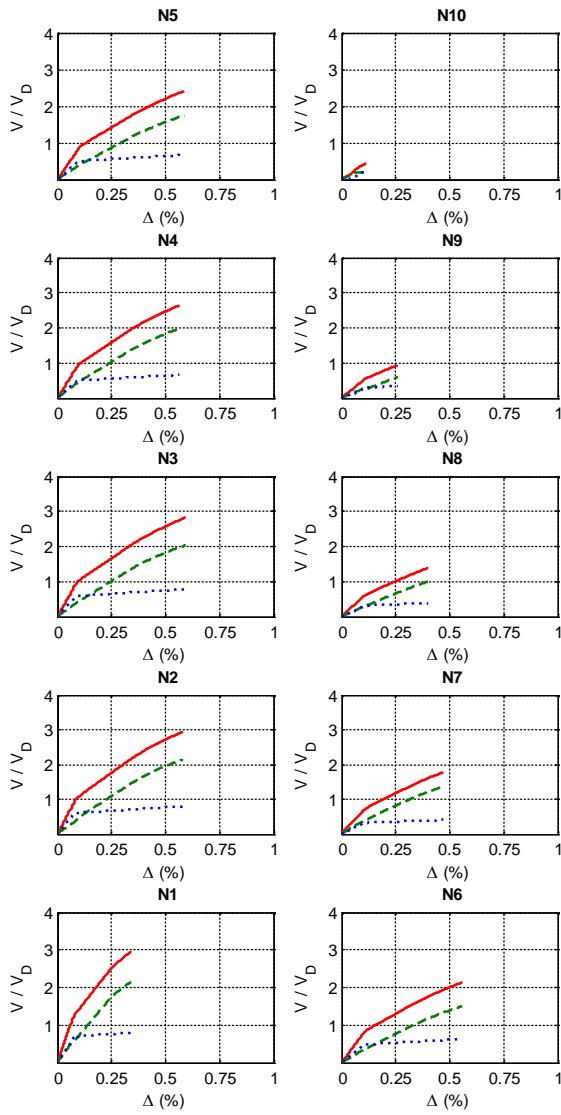


Figura A.69 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

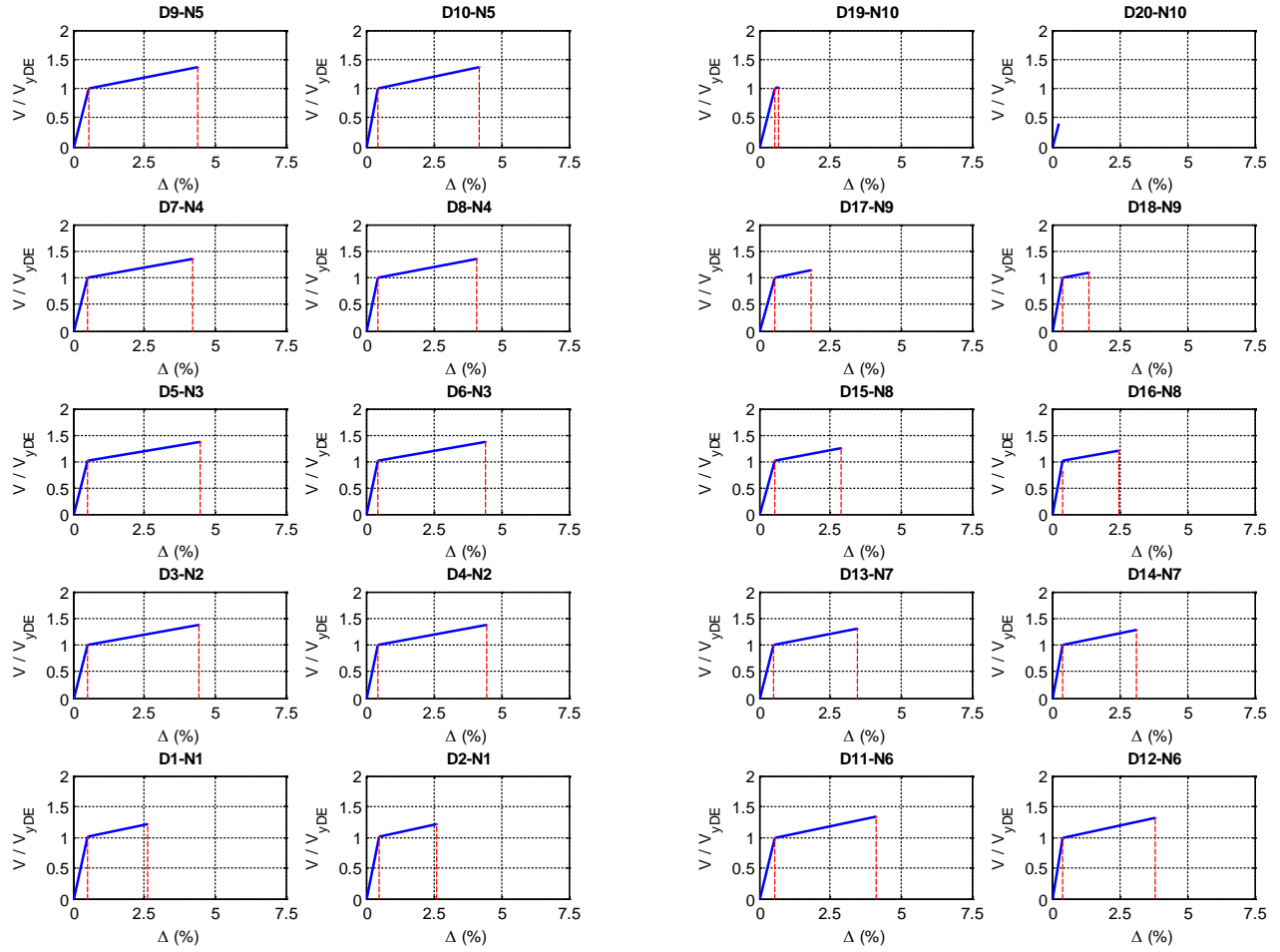


Figura A.70 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

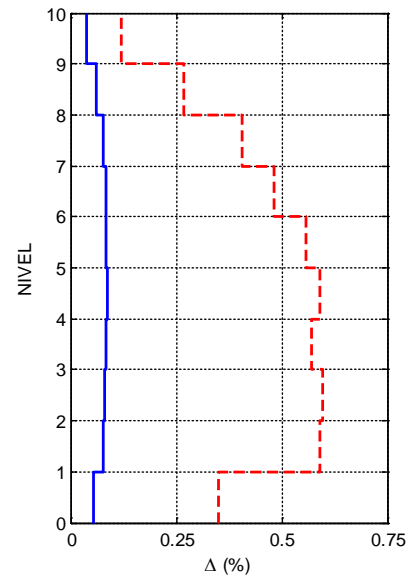
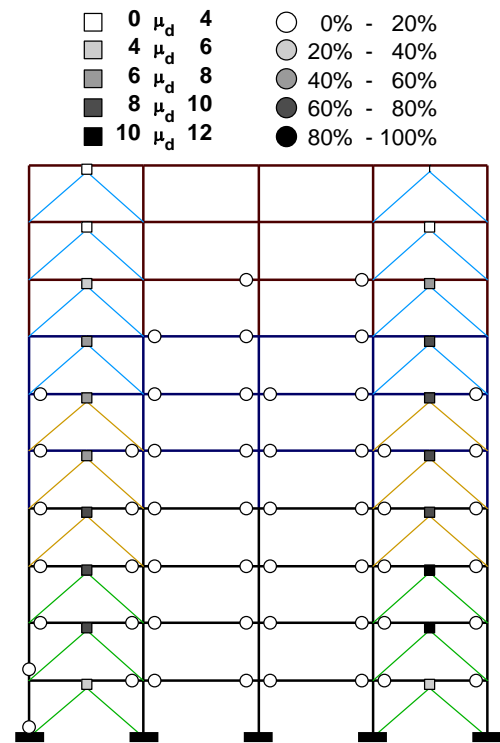
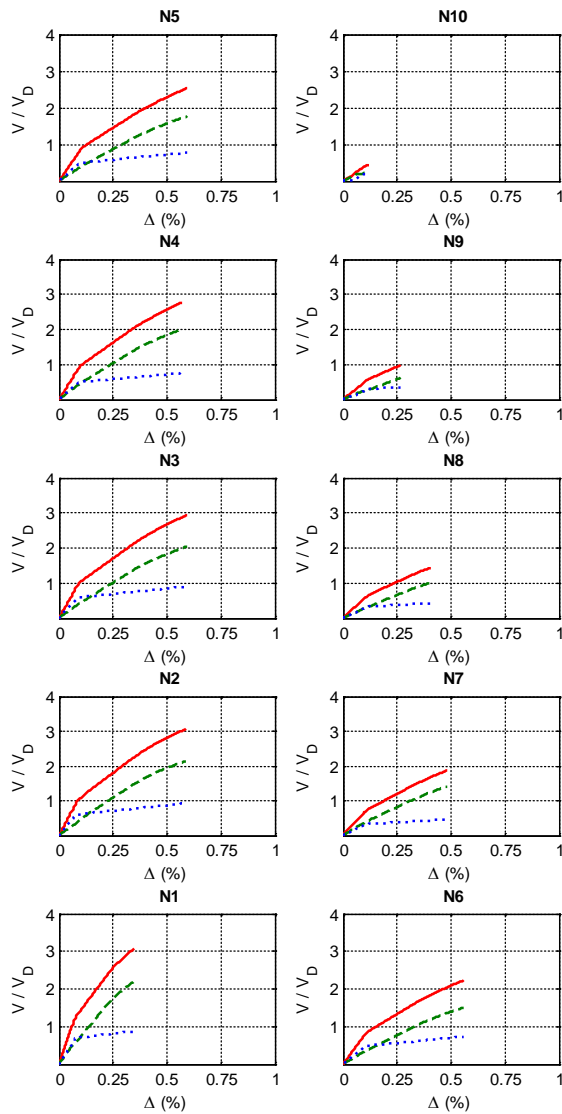
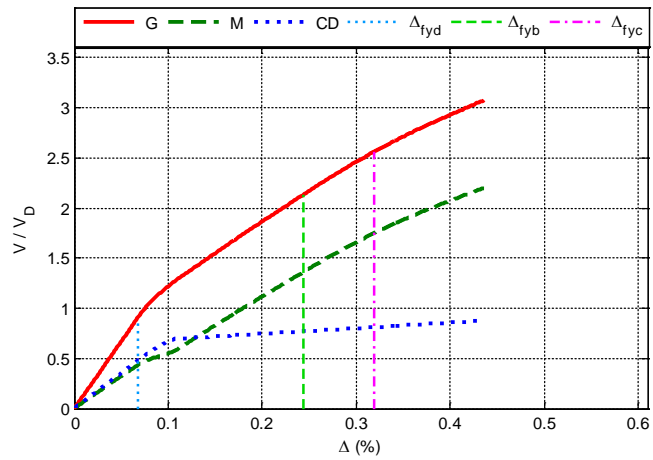


Figura A.71 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

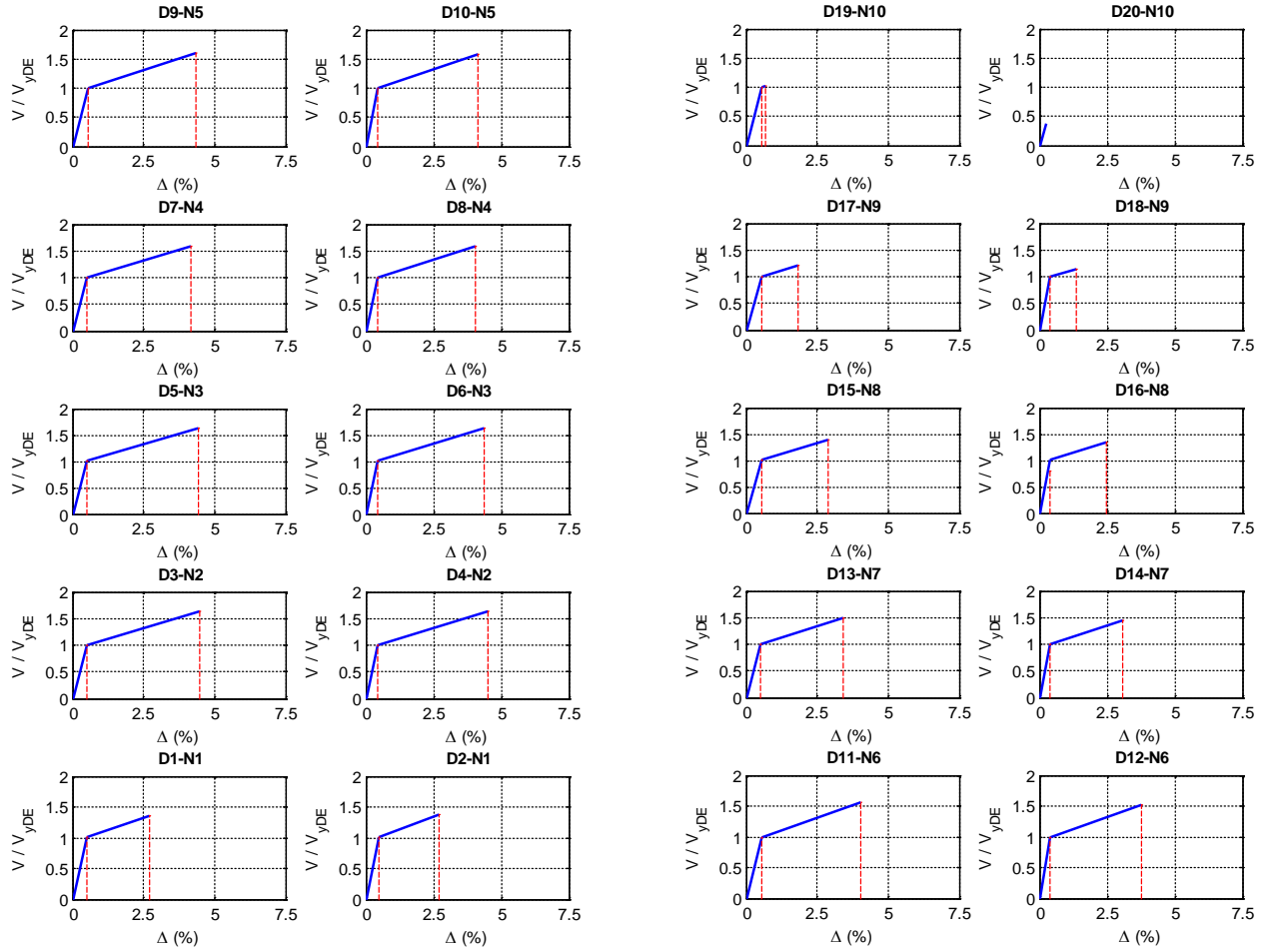


Figura A.72 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

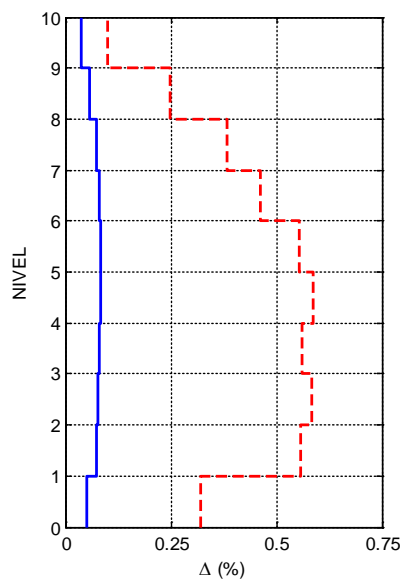
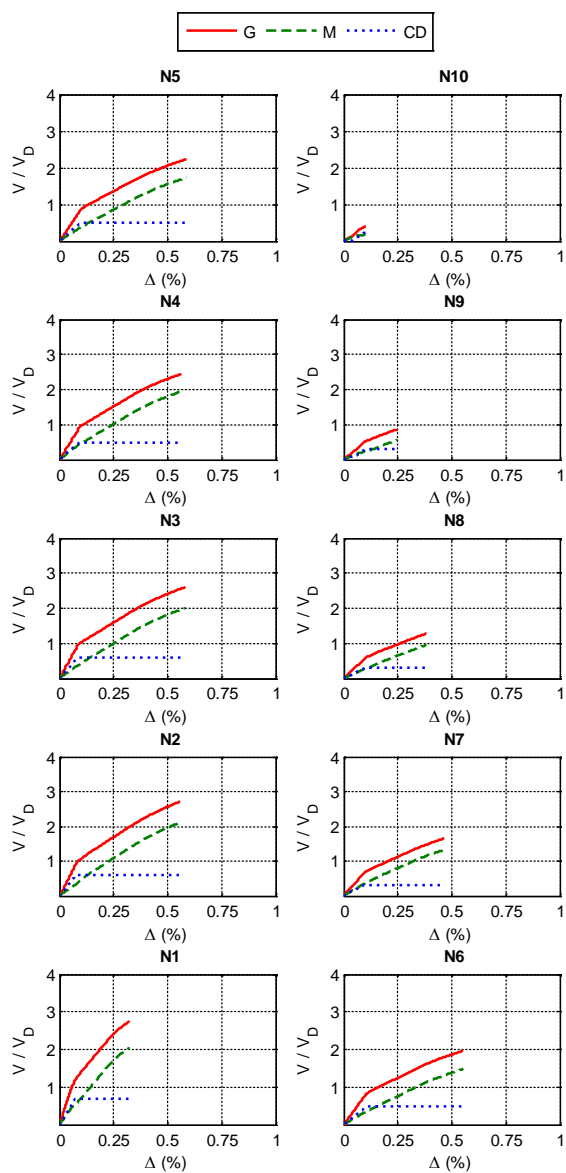
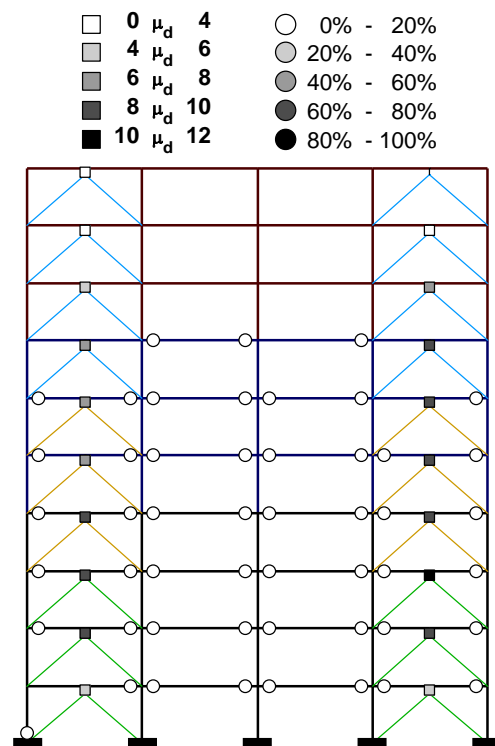
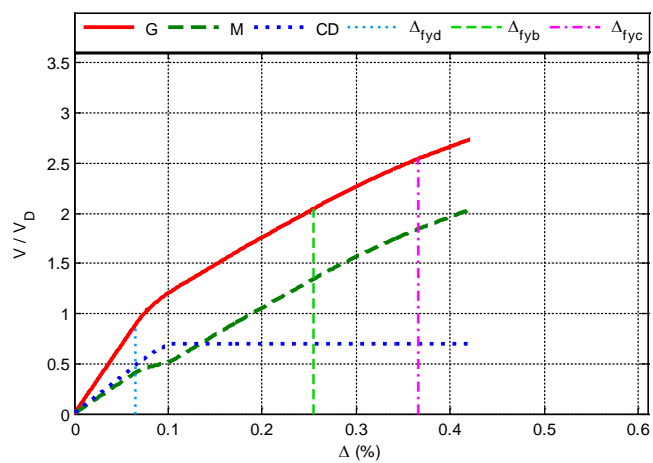


Figura A.73 $N = 10$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

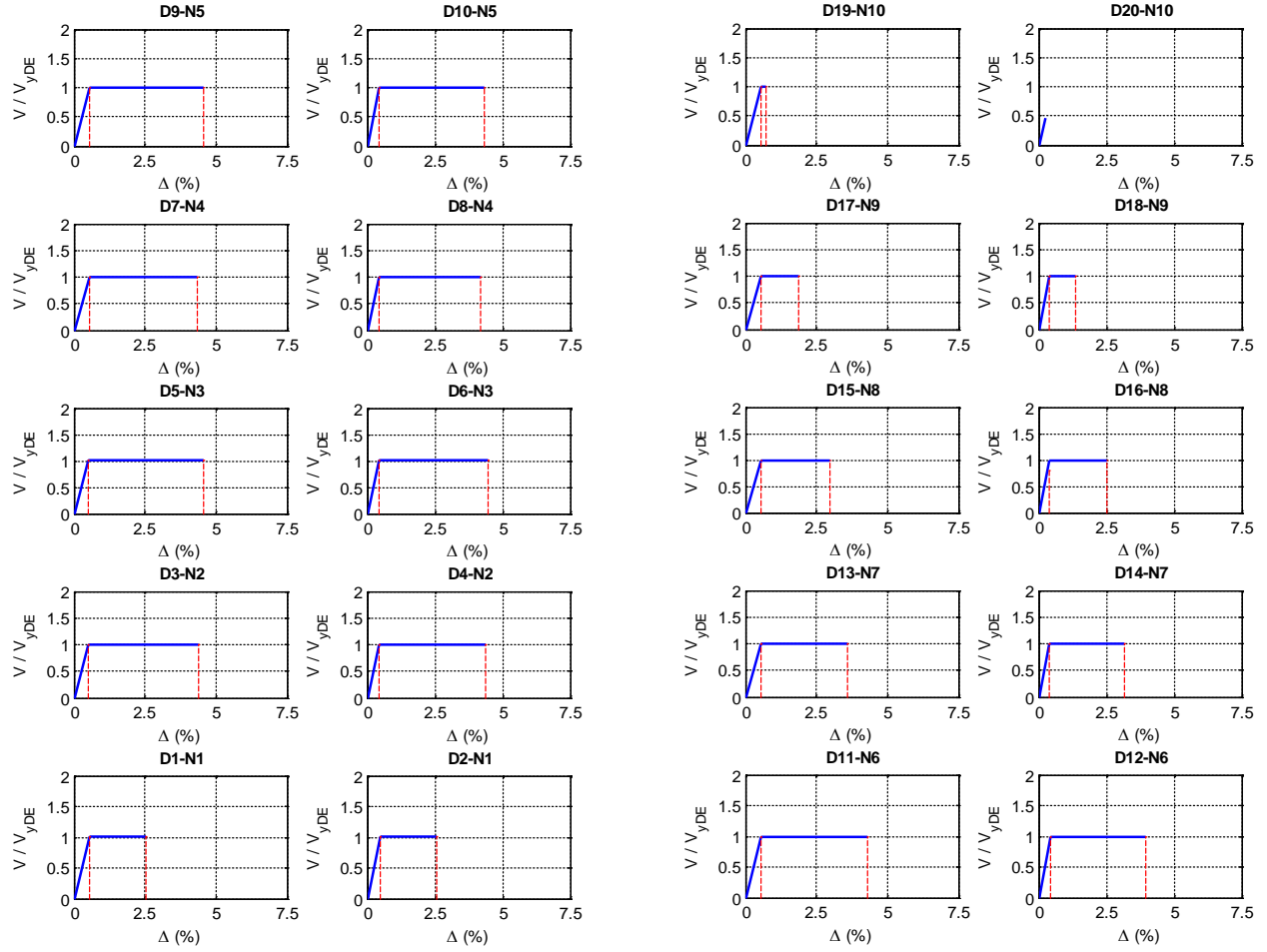
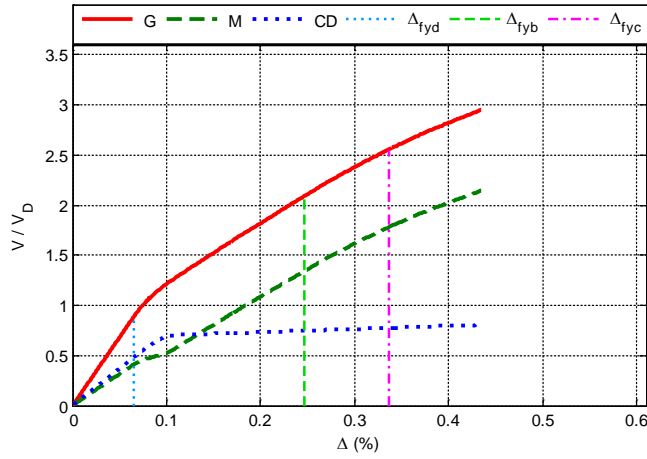


Figura A.74 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$



— G — M ... CD

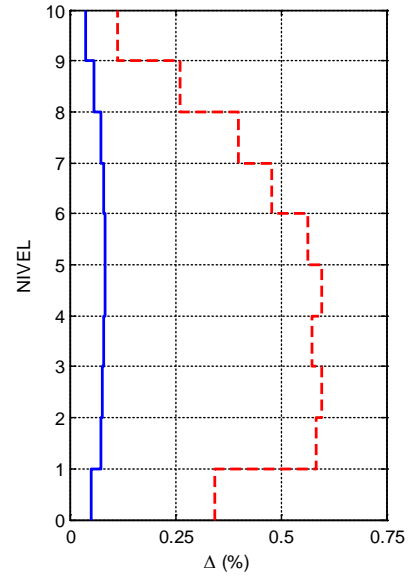
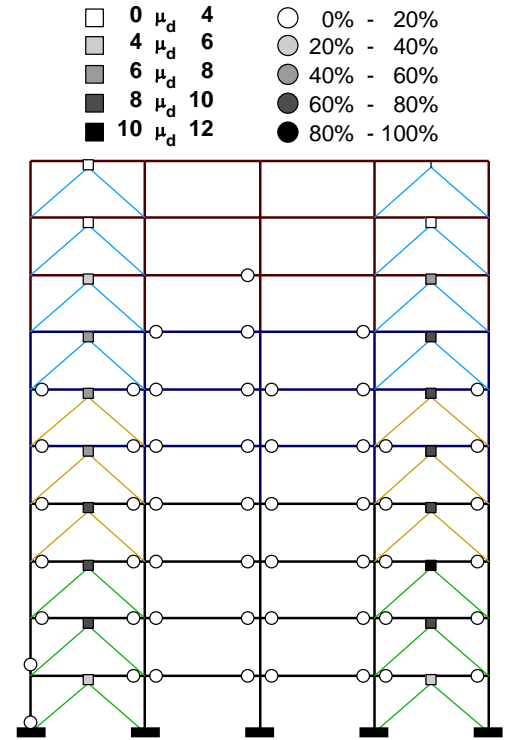
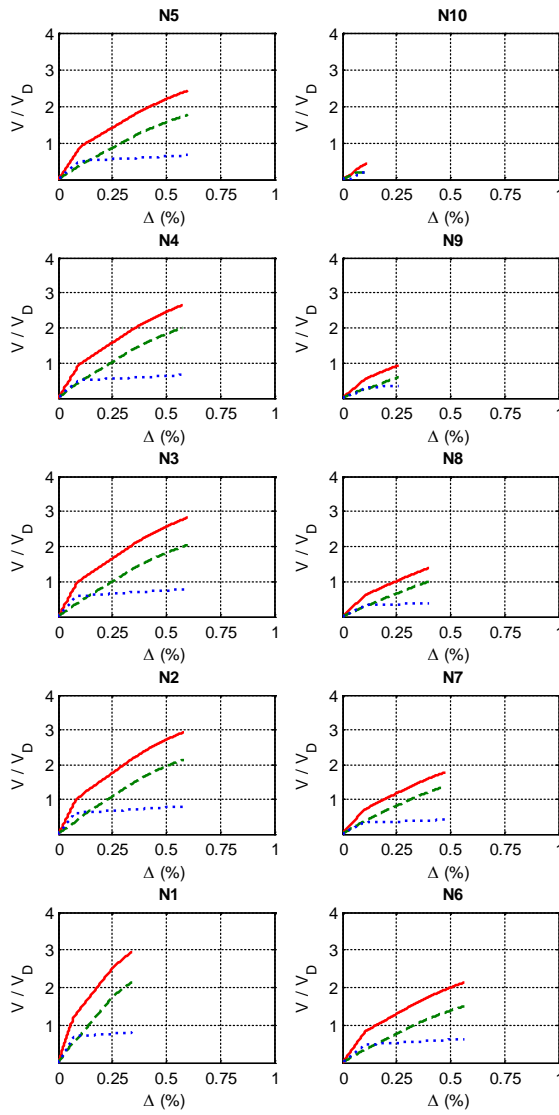


Figura A.75 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

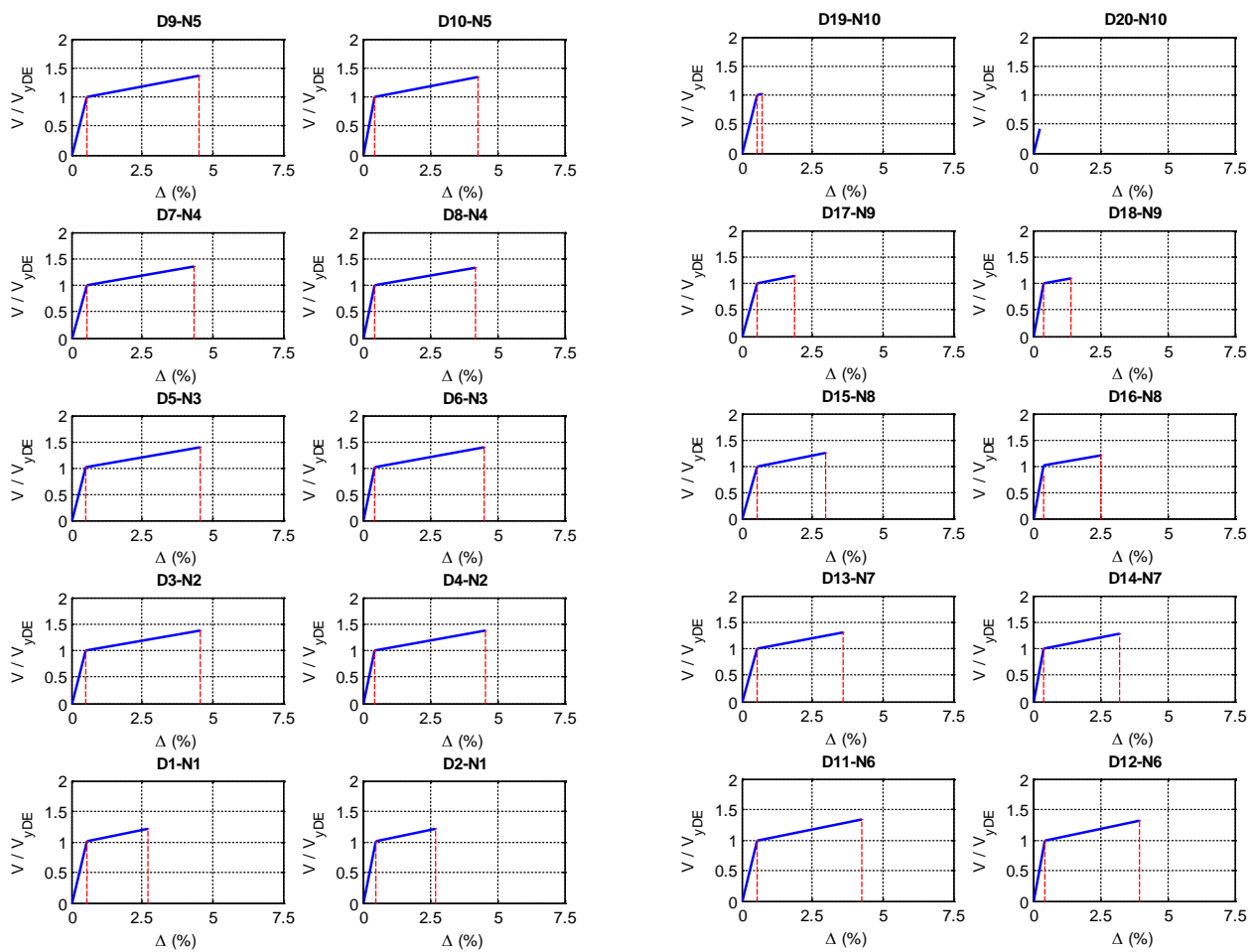


Figura A.76 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

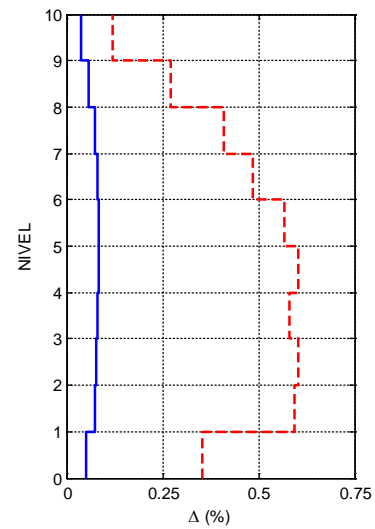
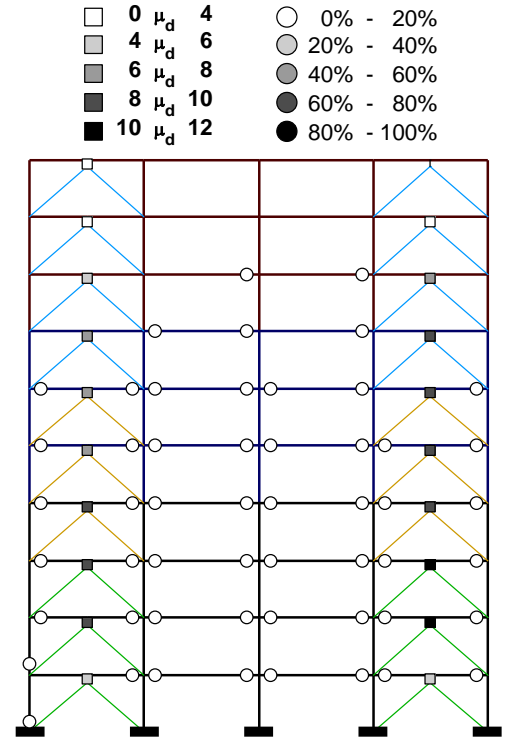
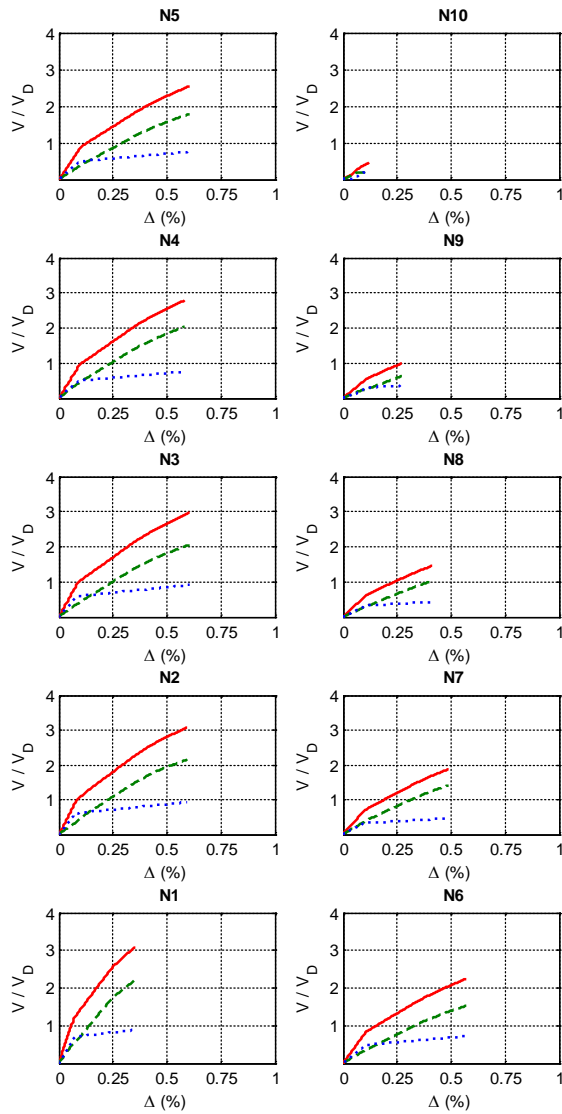
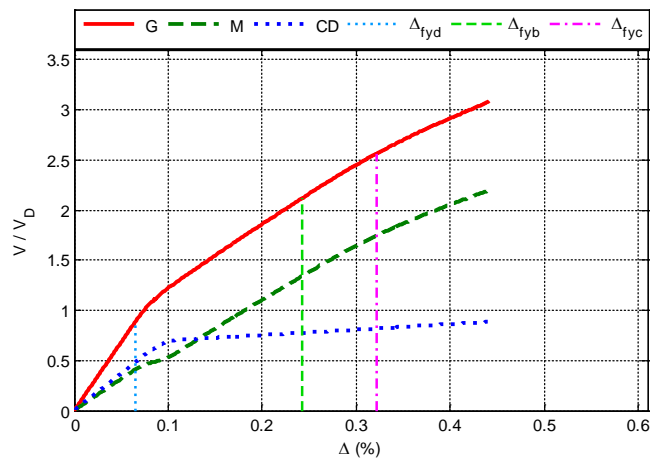


Figura A.77 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

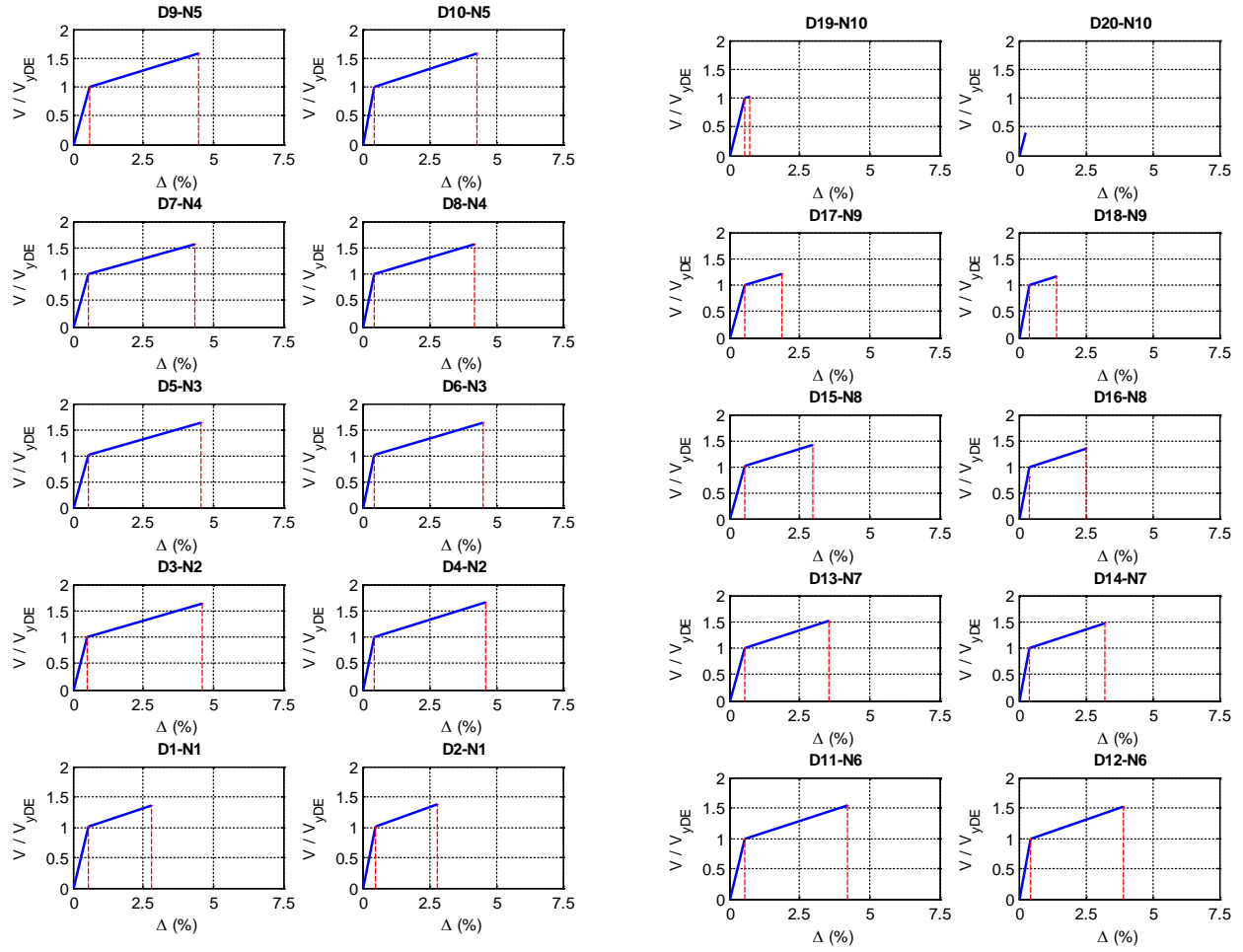


Figura A.78 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

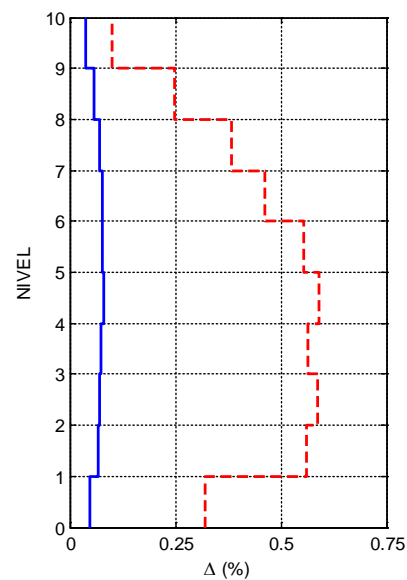
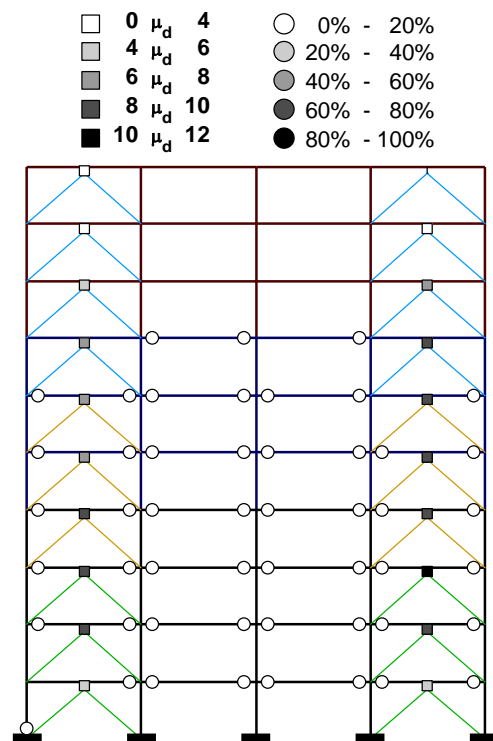
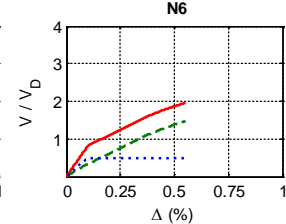
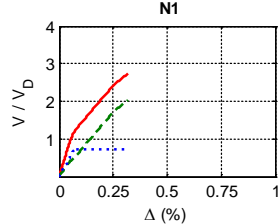
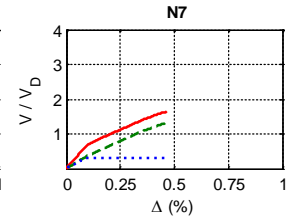
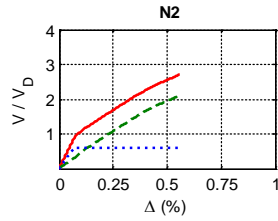
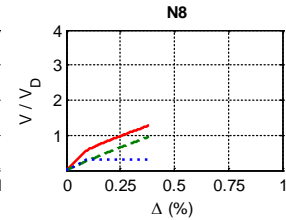
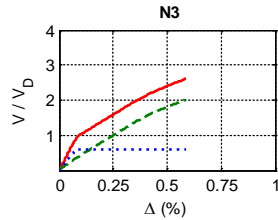
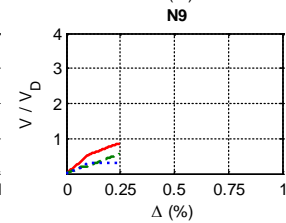
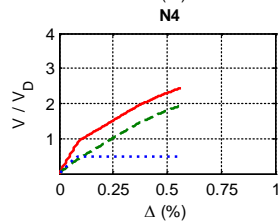
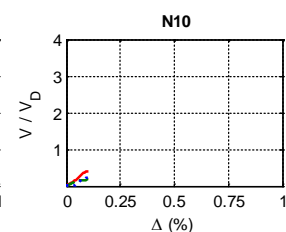
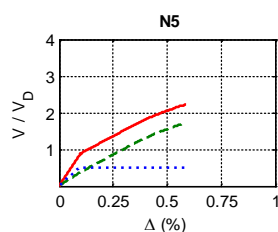
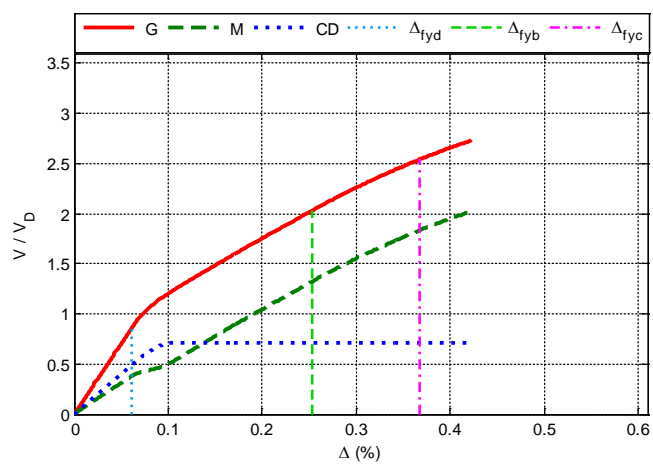


Figura A.79 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

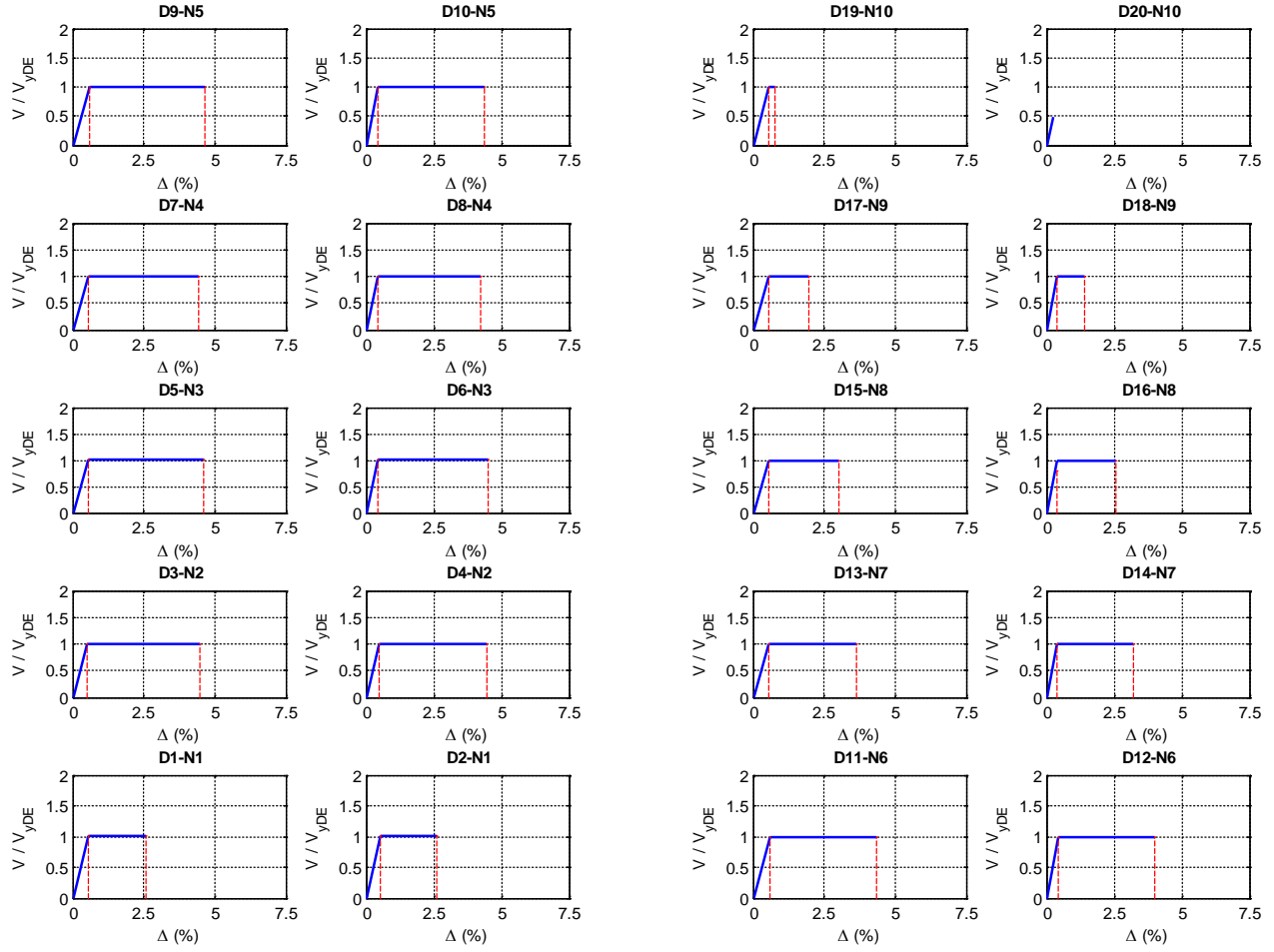


Figura A.80 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

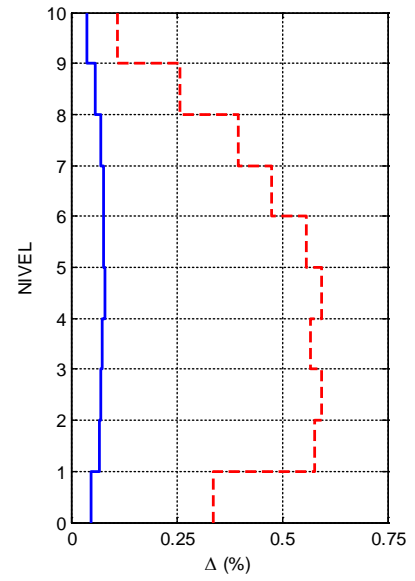
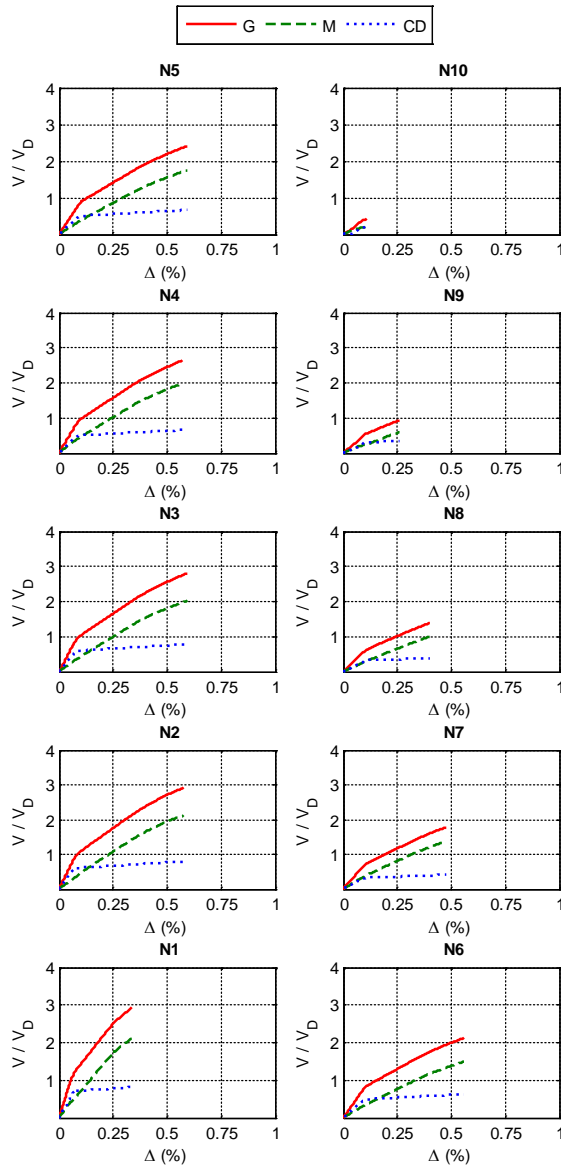
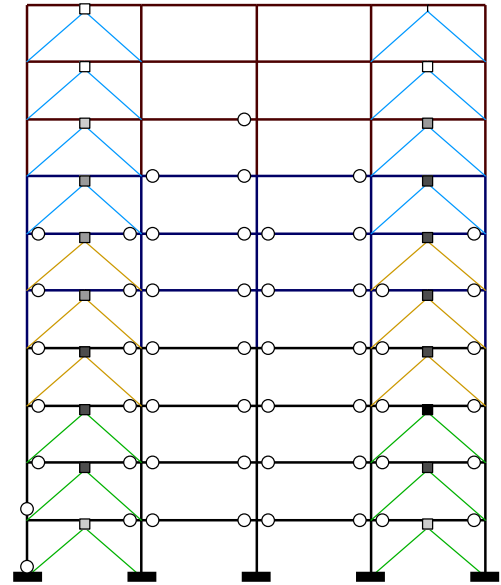
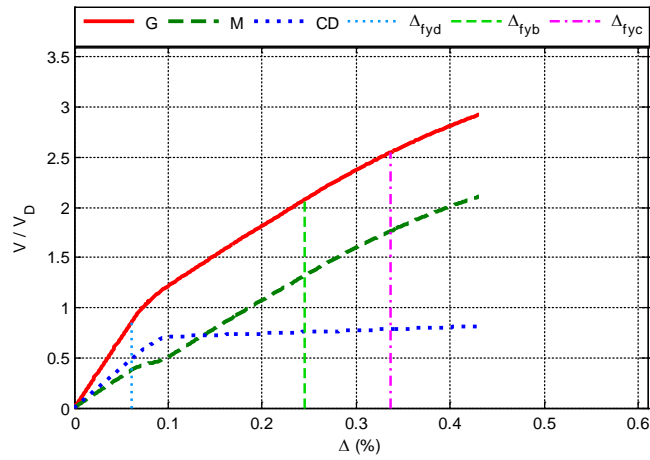


Figura A.81 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

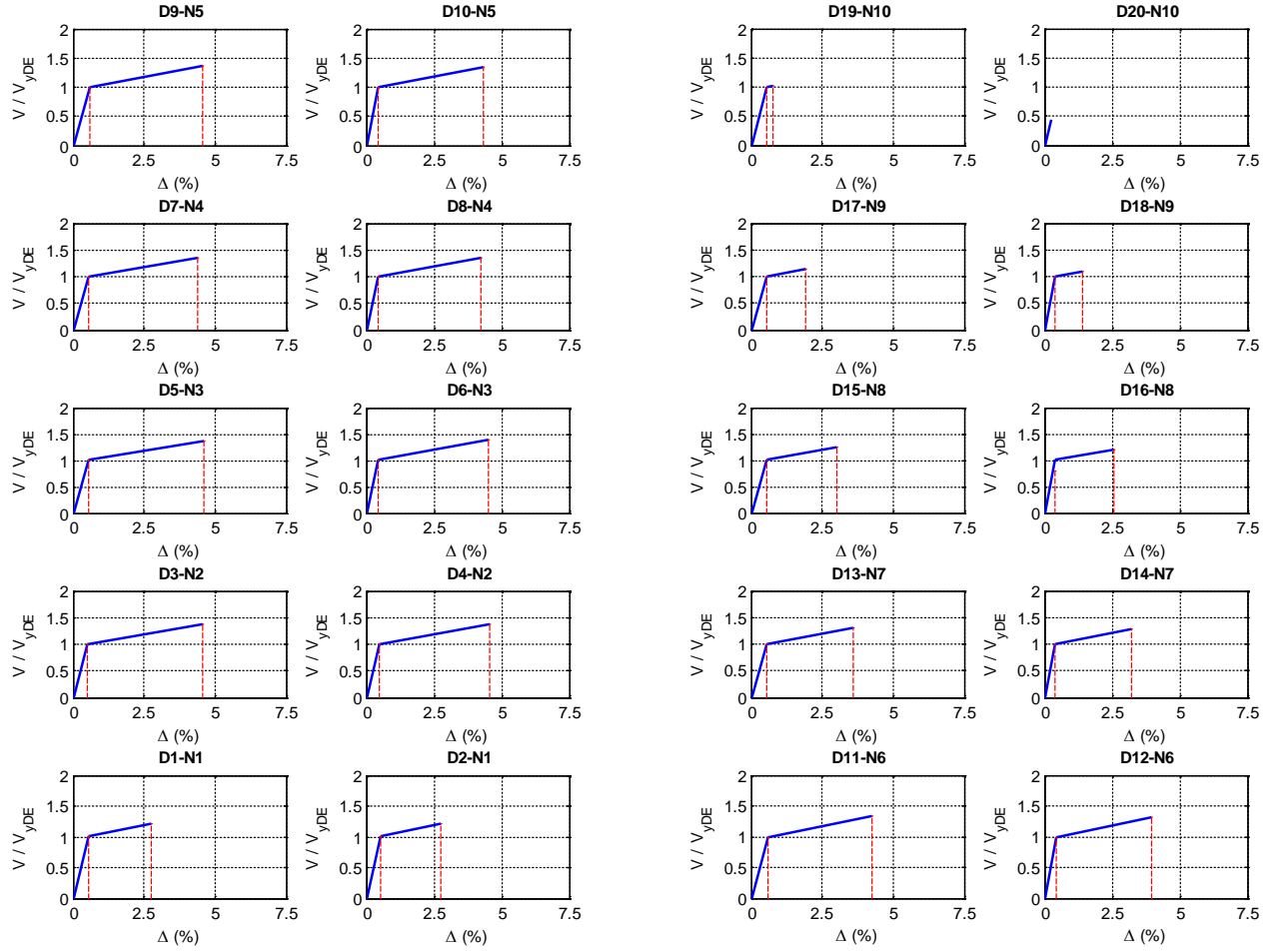


Figura A.83 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

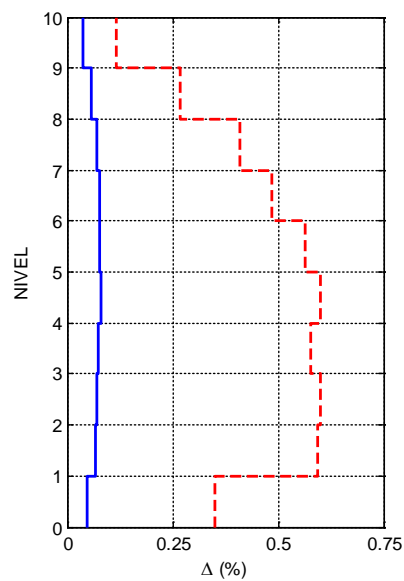
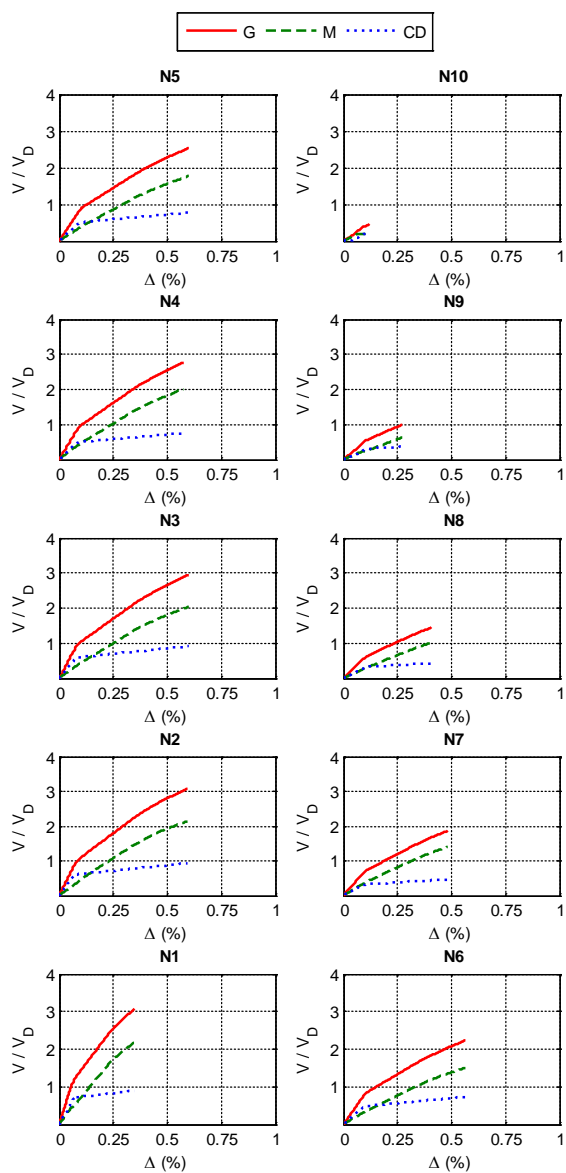
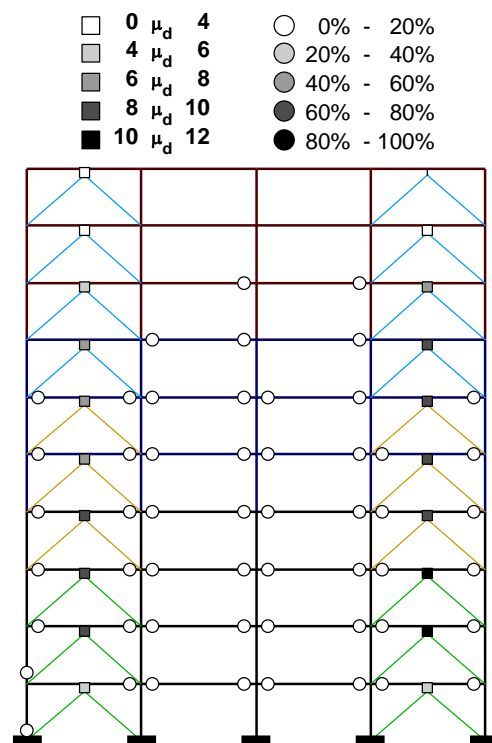
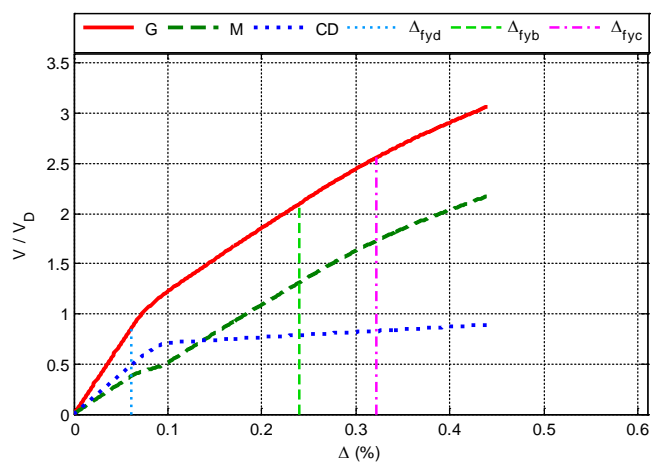


Figura A.82 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

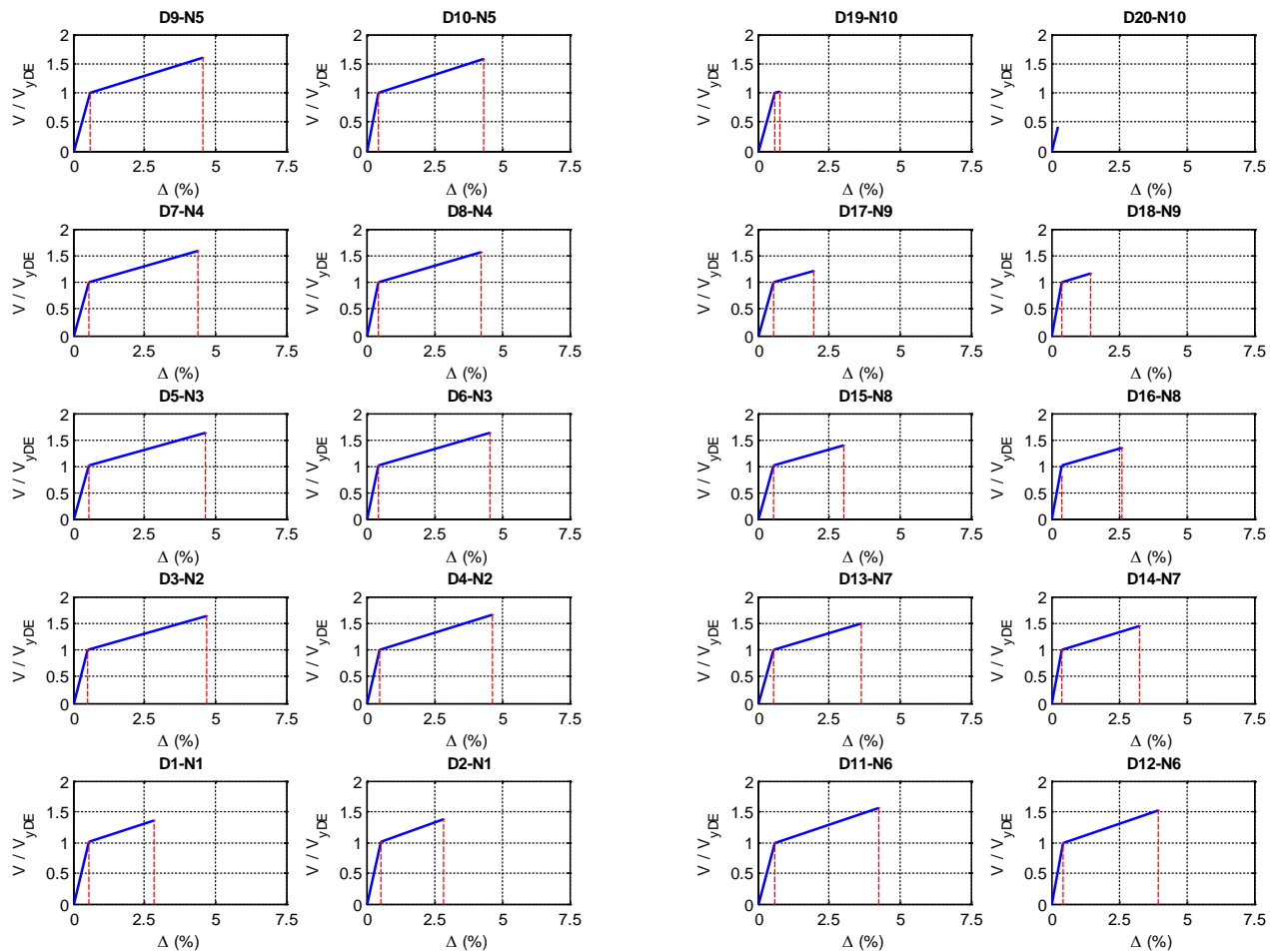


Figura A.84 $N = 10, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

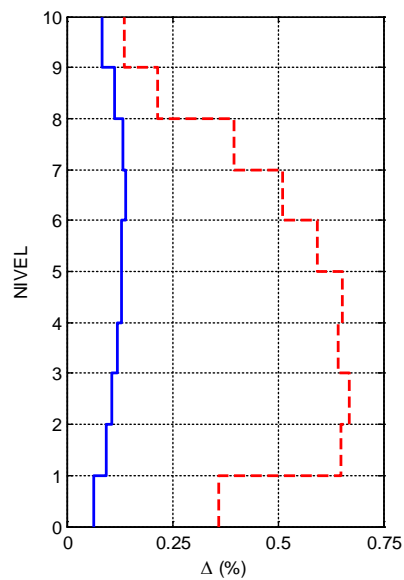
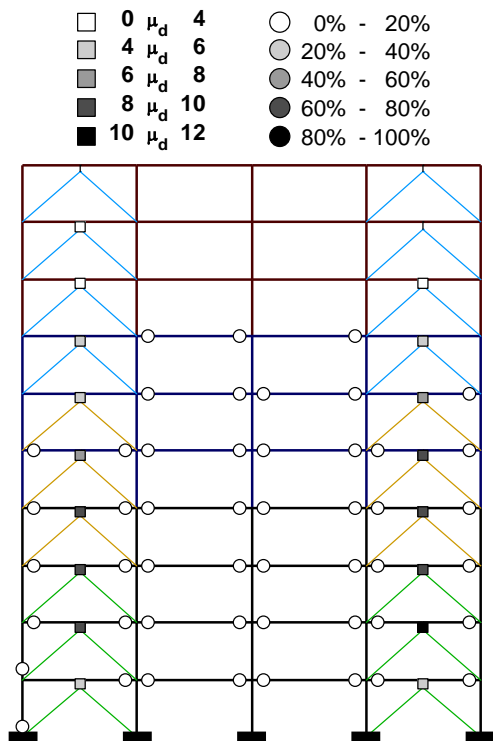
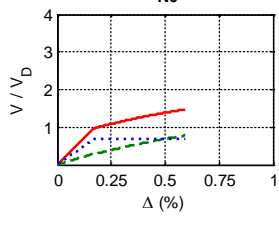
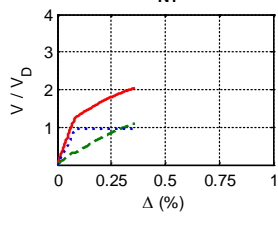
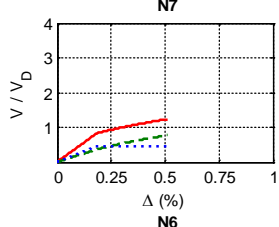
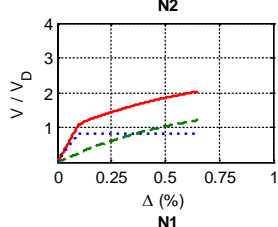
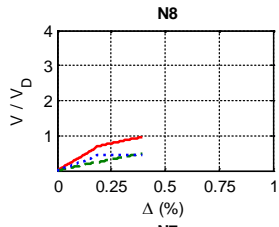
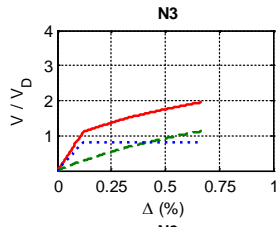
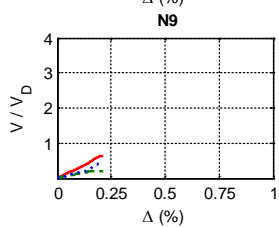
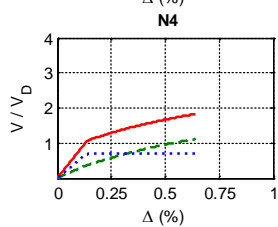
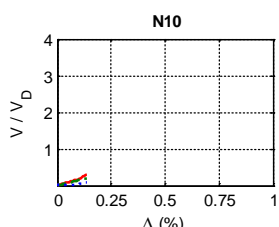
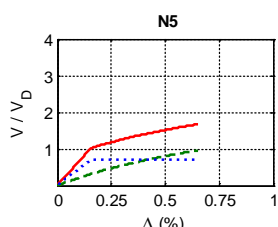
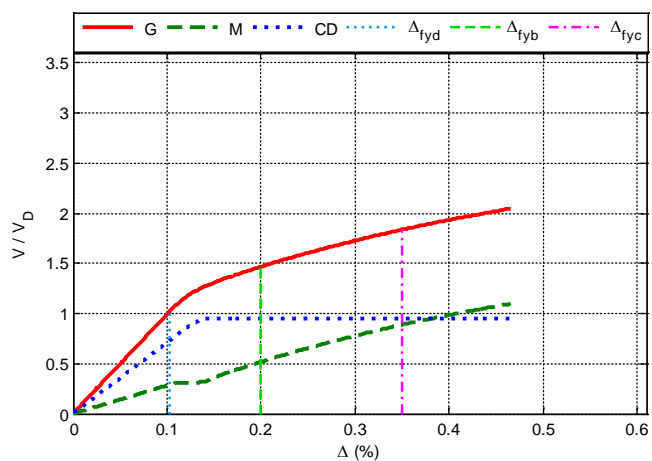


Figura A.85 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

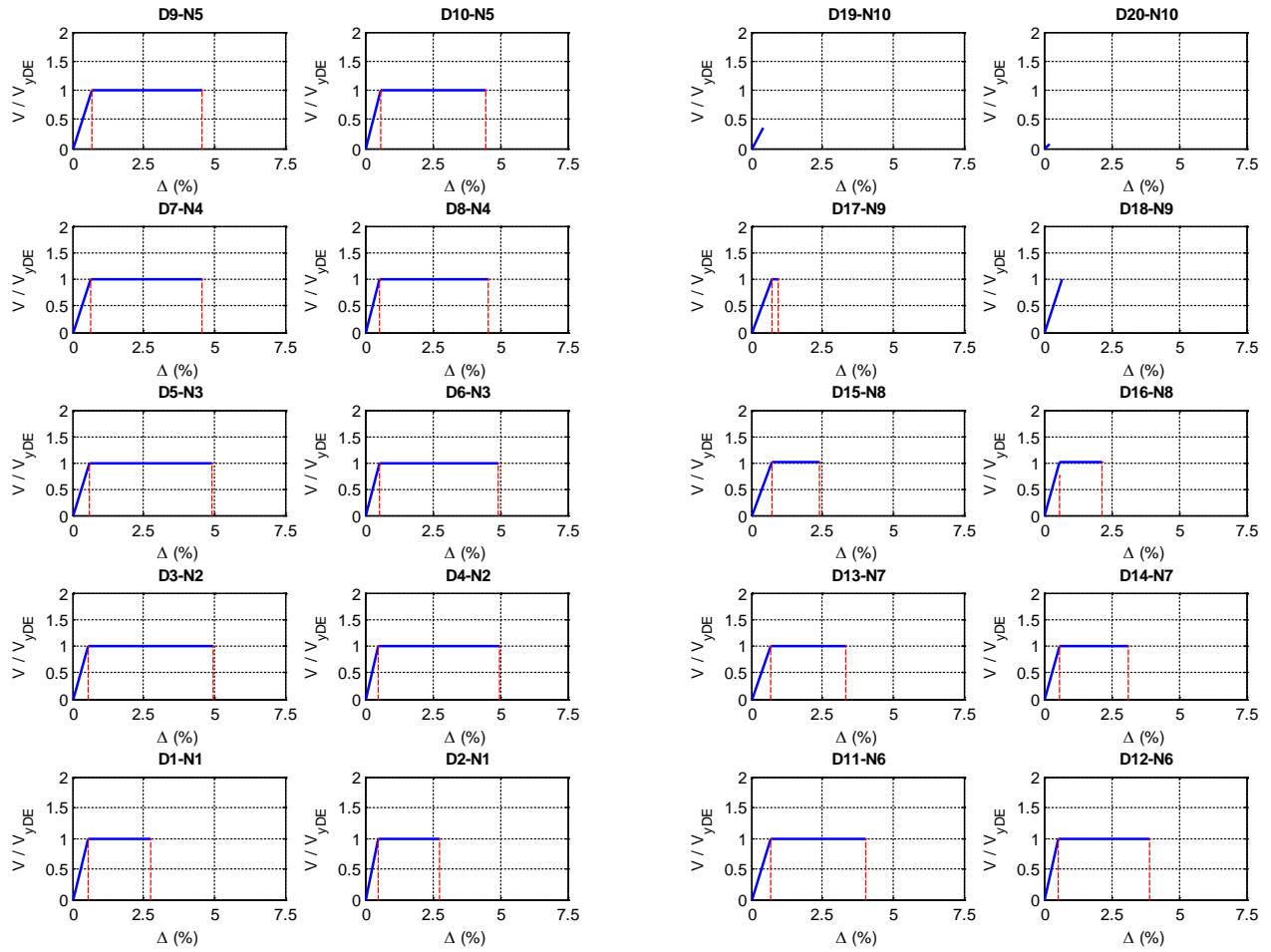


Figura A.86 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

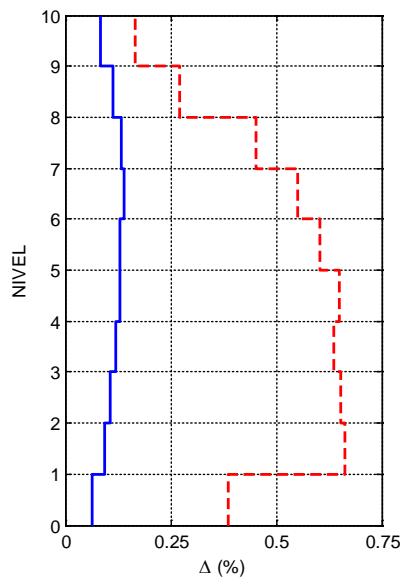
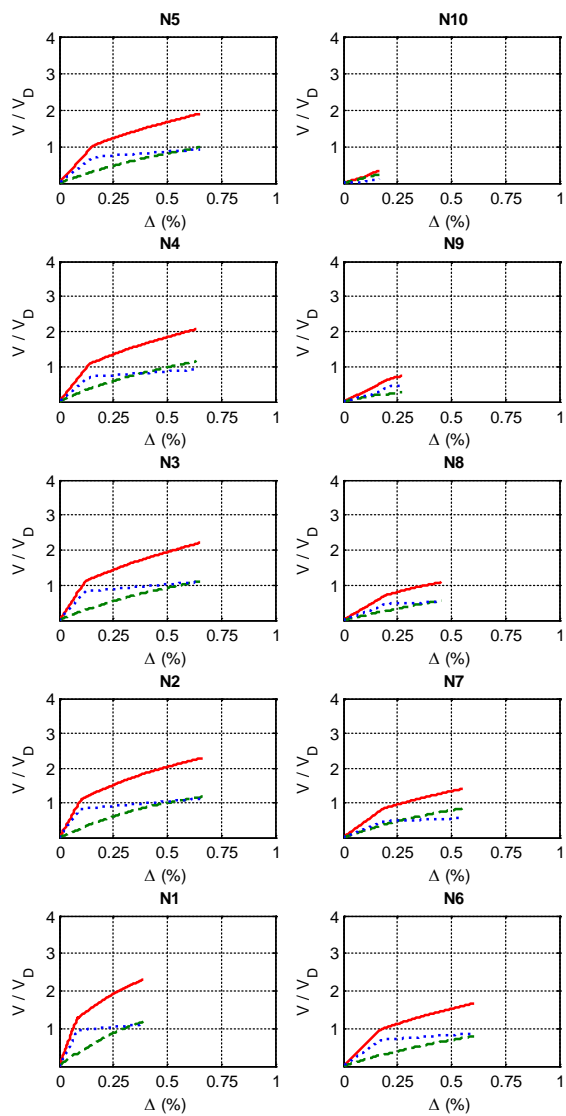
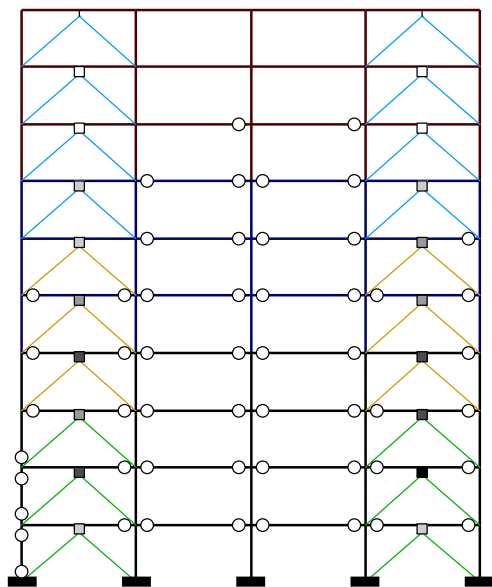
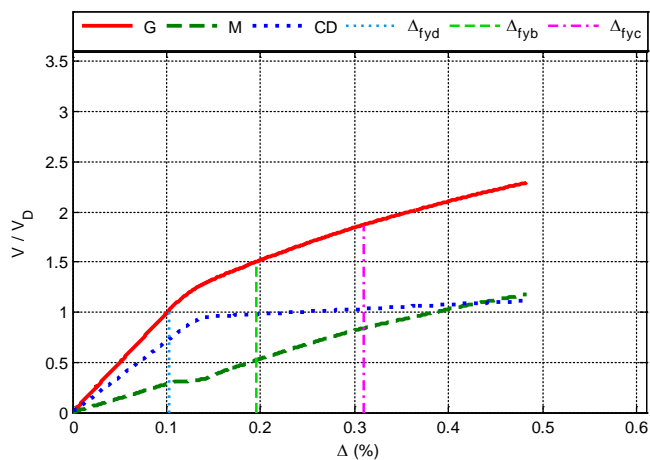


Figura A.87 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

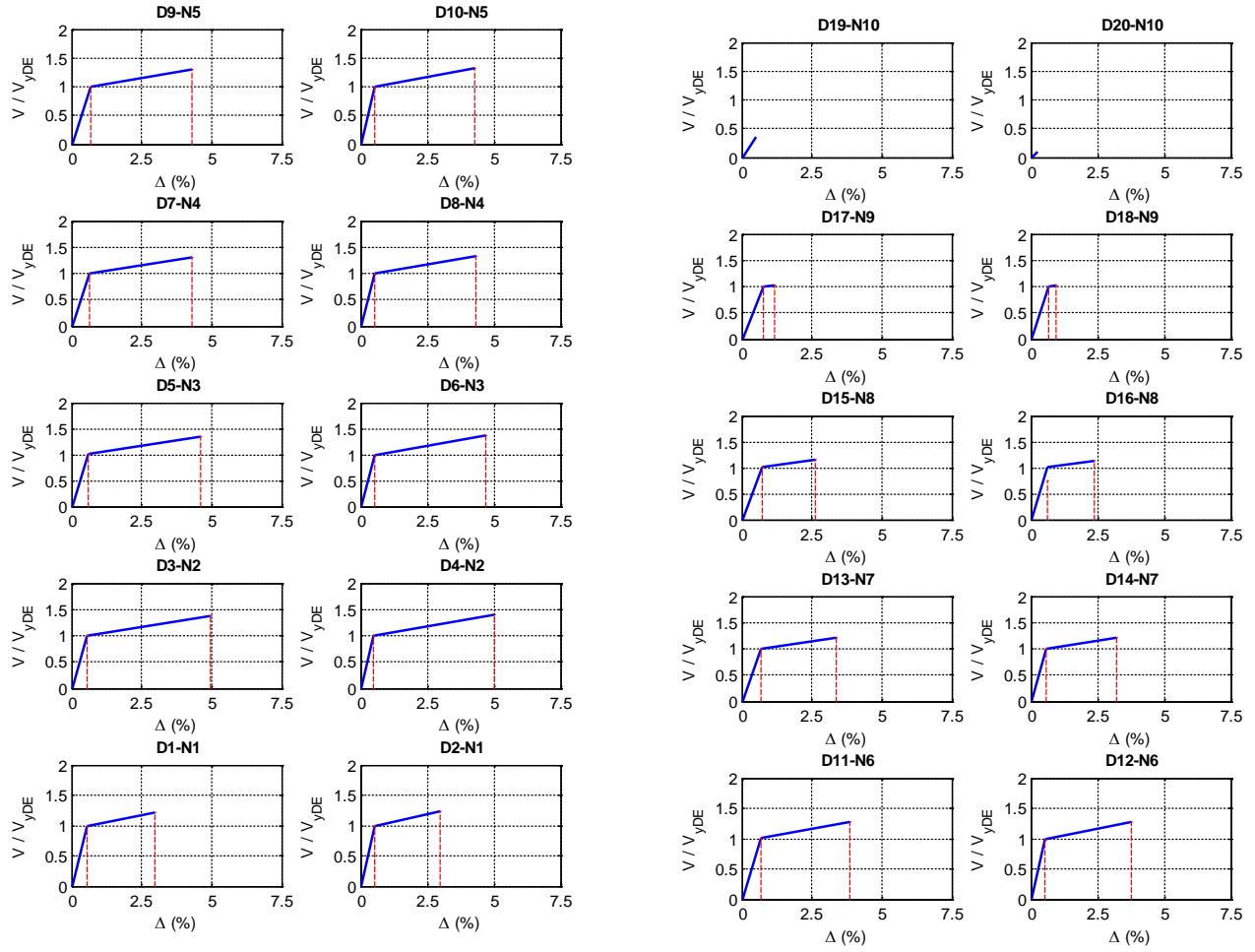


Figura A.88 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

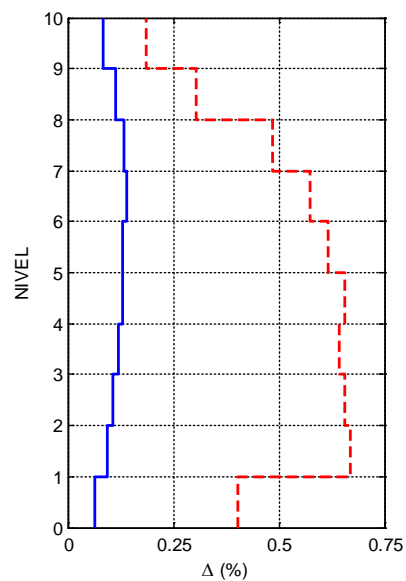
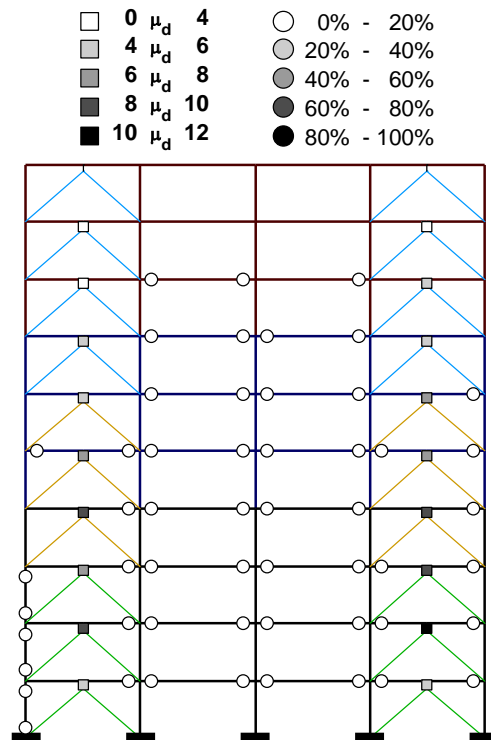
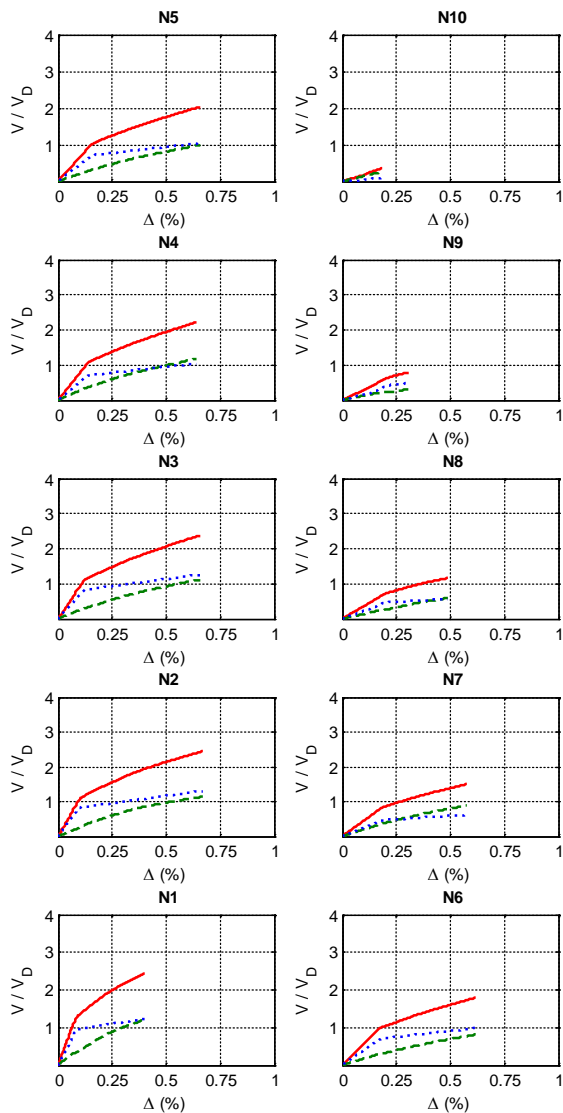
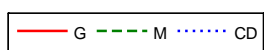
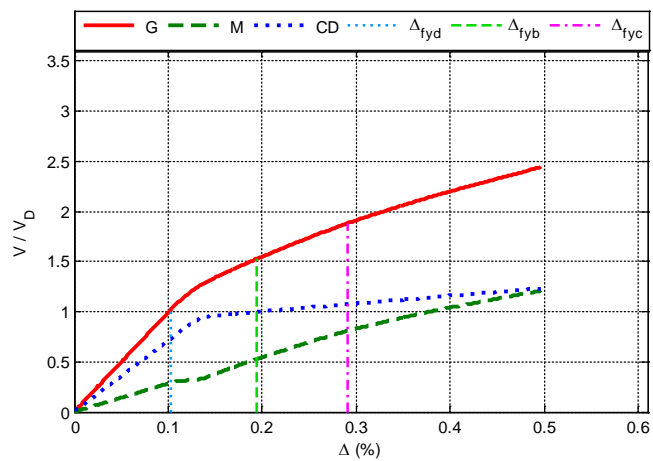


Figura A.89 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

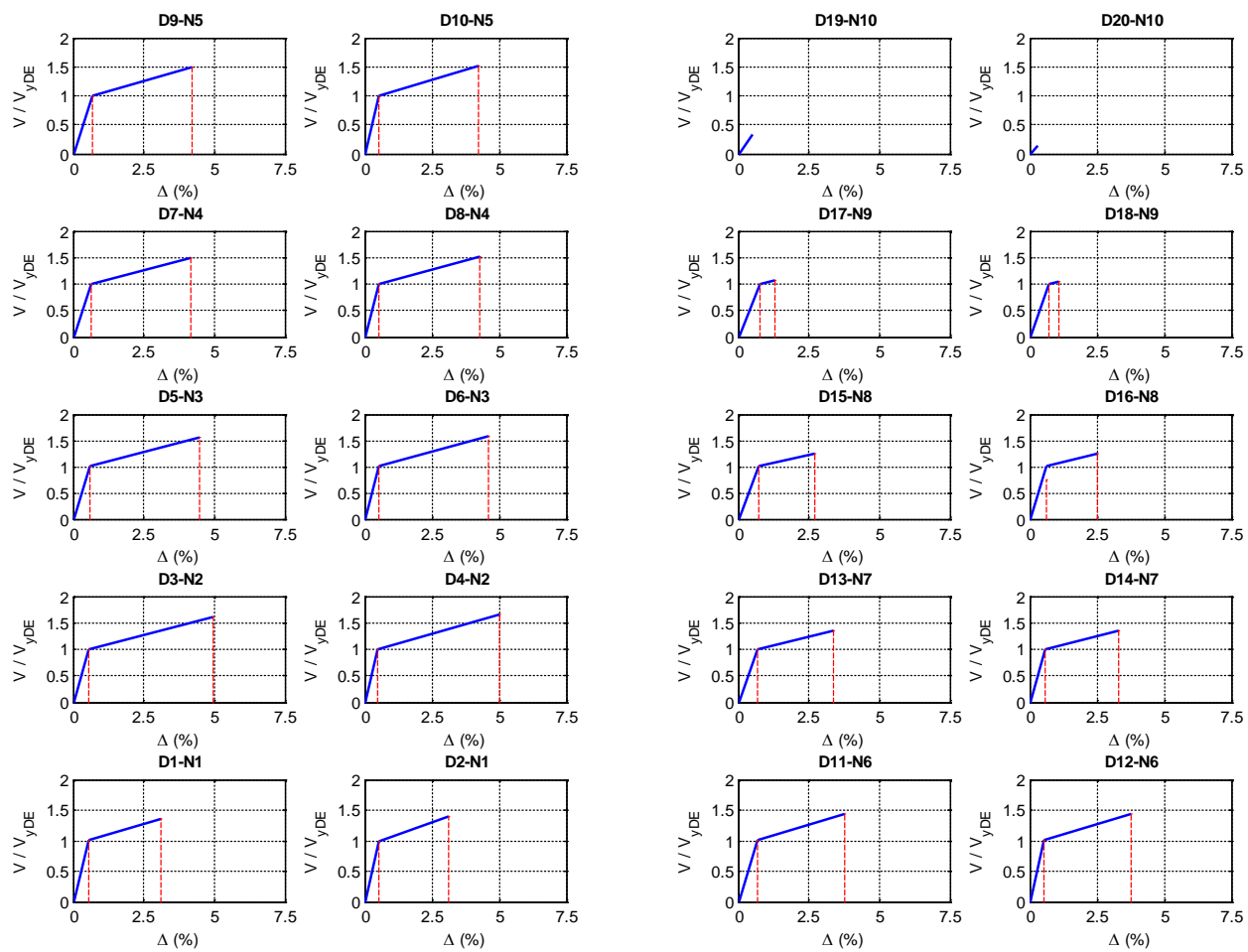


Figura A.90 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

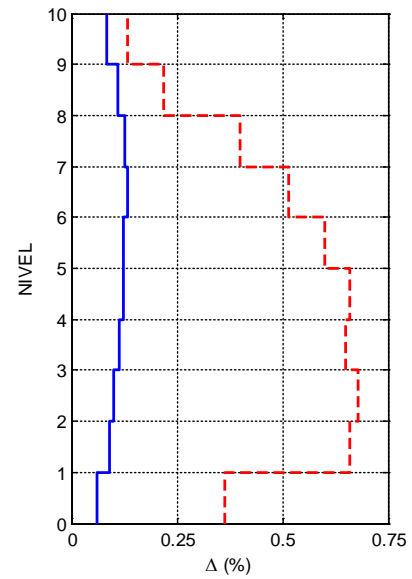
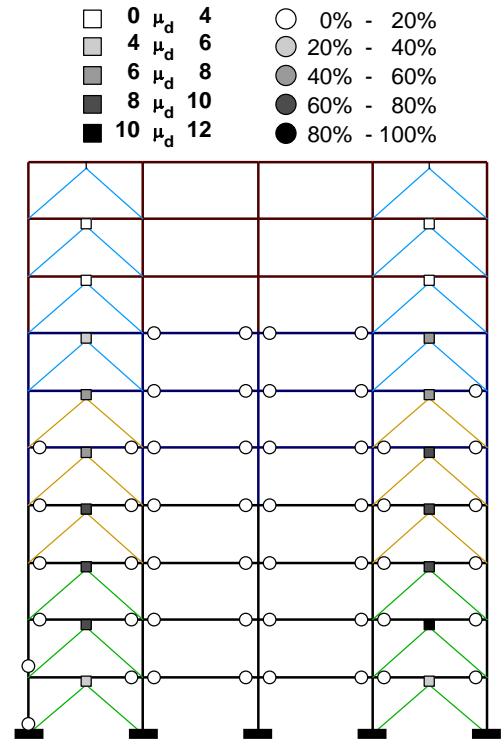
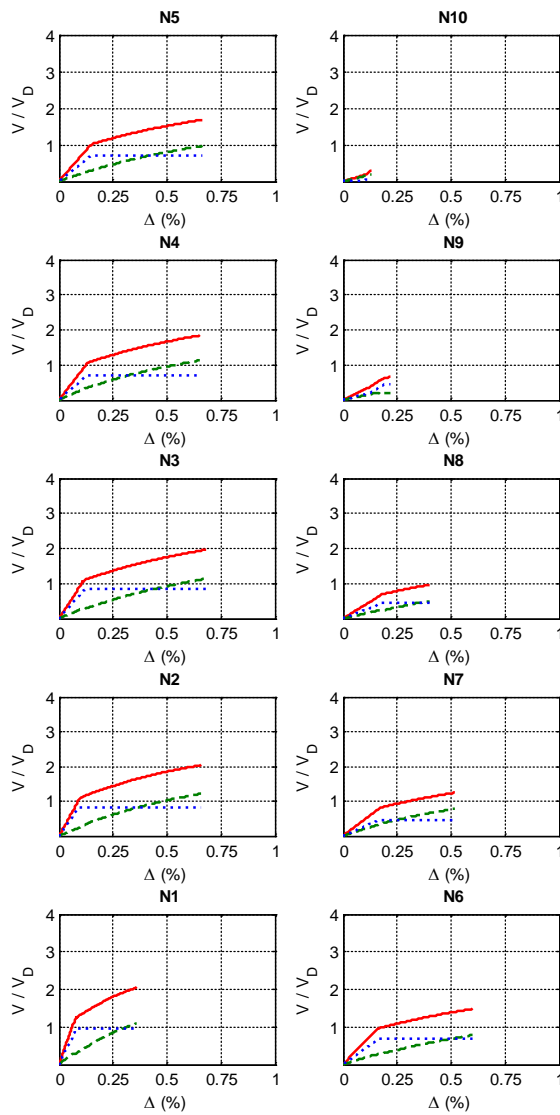
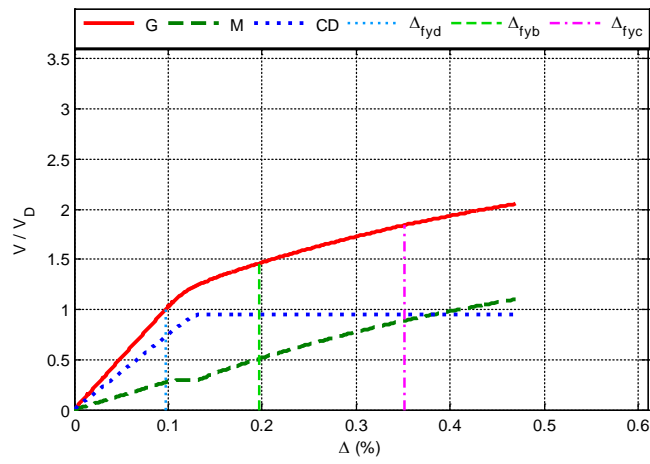


Figura A.91 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

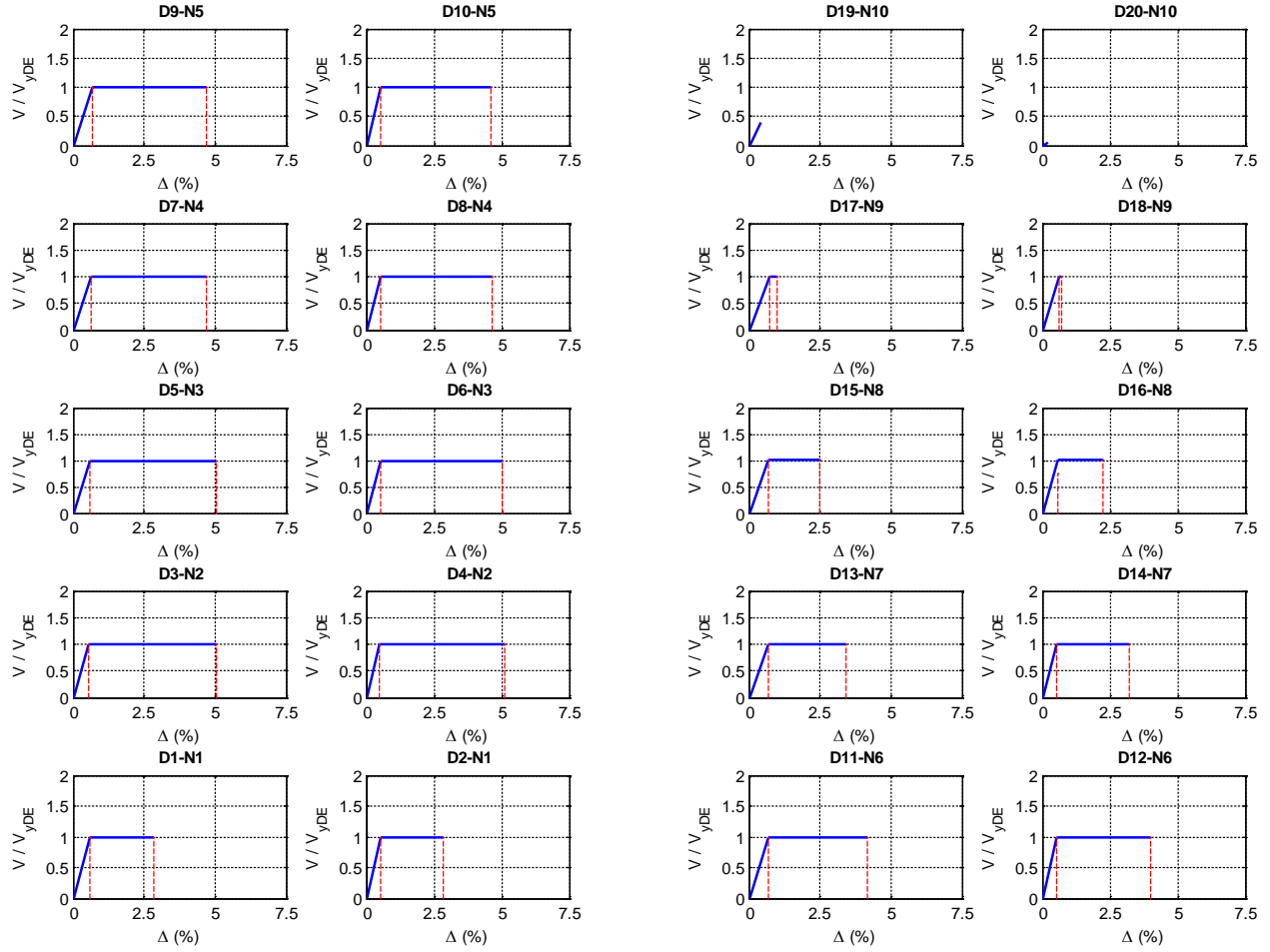


Figura A.92 $N = 10$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

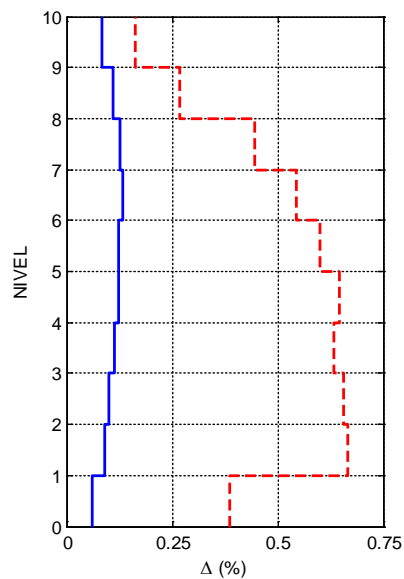
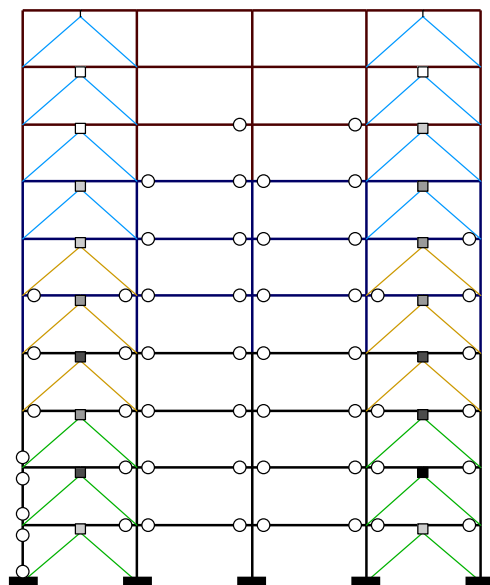
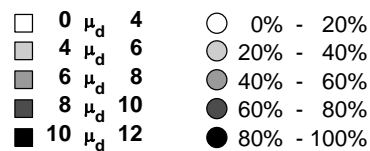
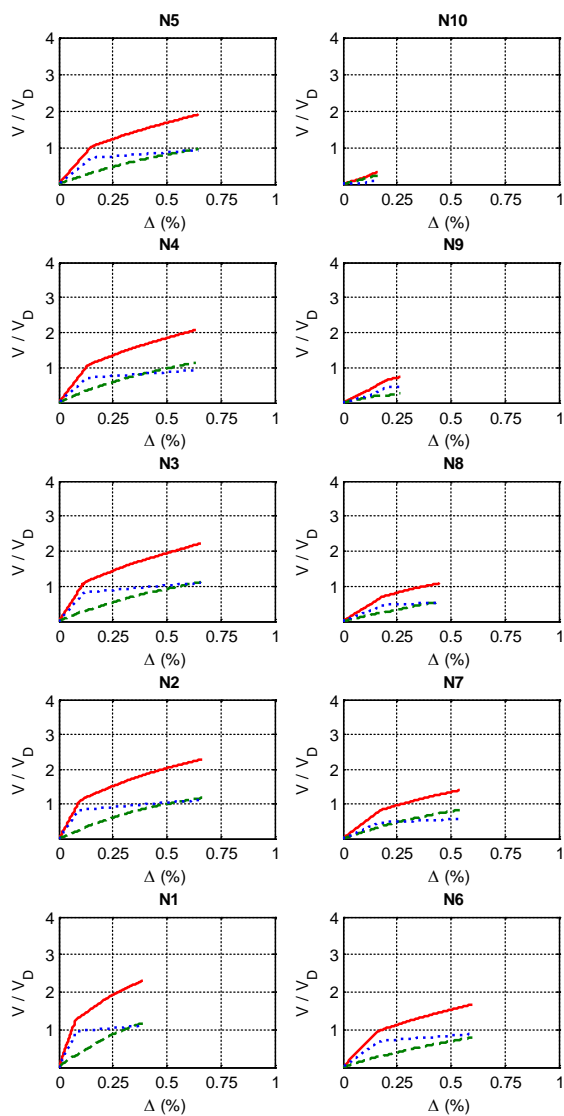
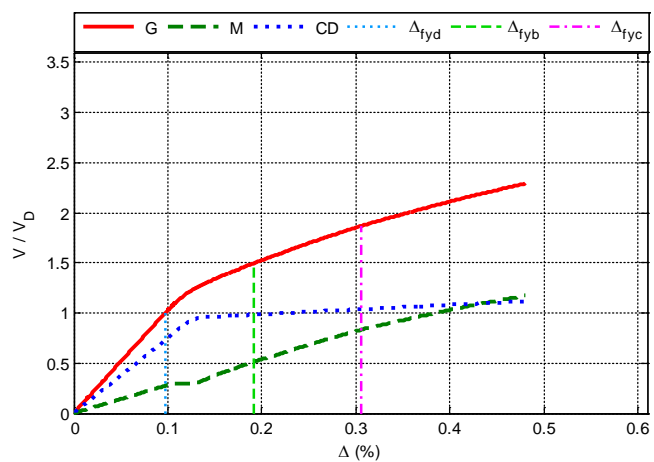


Figura A.93 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

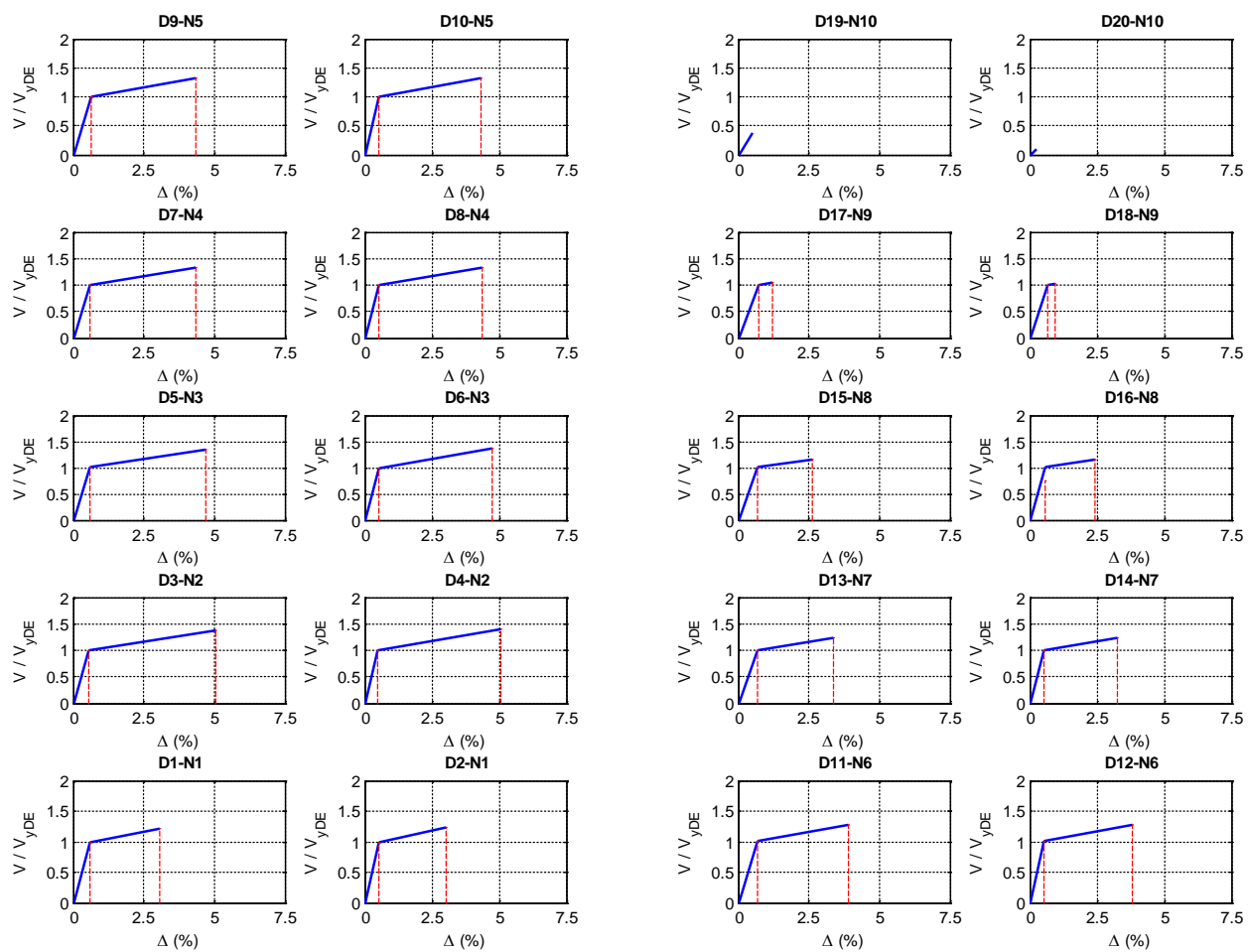


Figura A.94 $N = 10$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

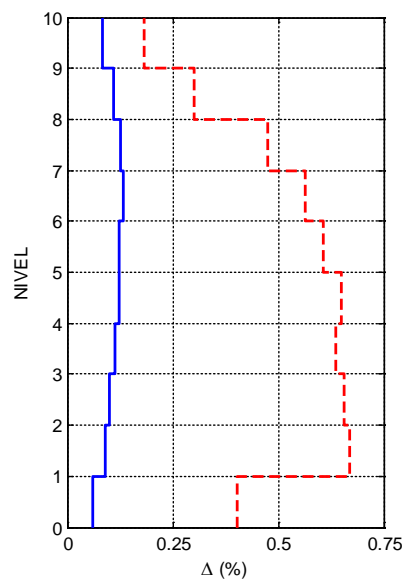
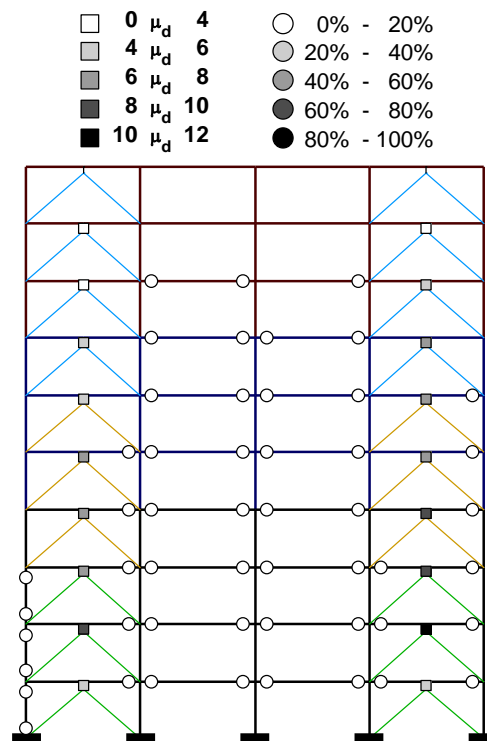
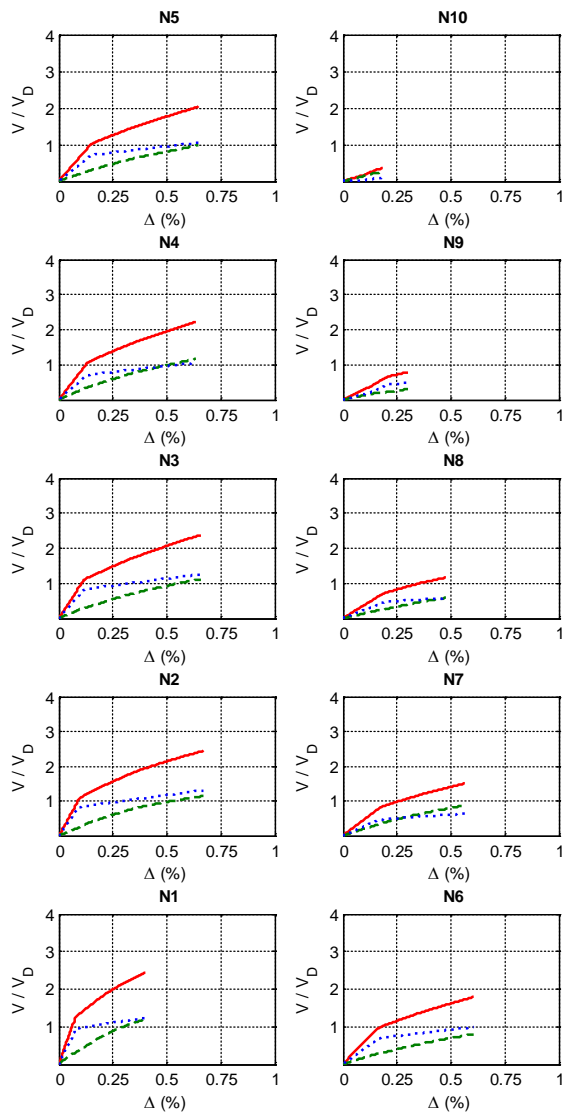
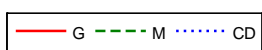
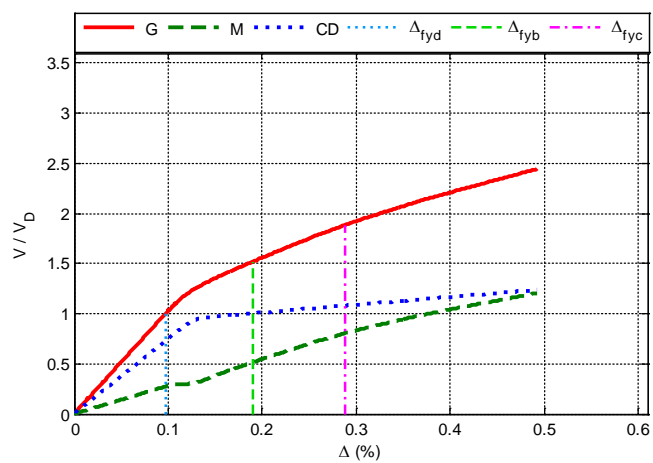


Figura A.95 $N = 10$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

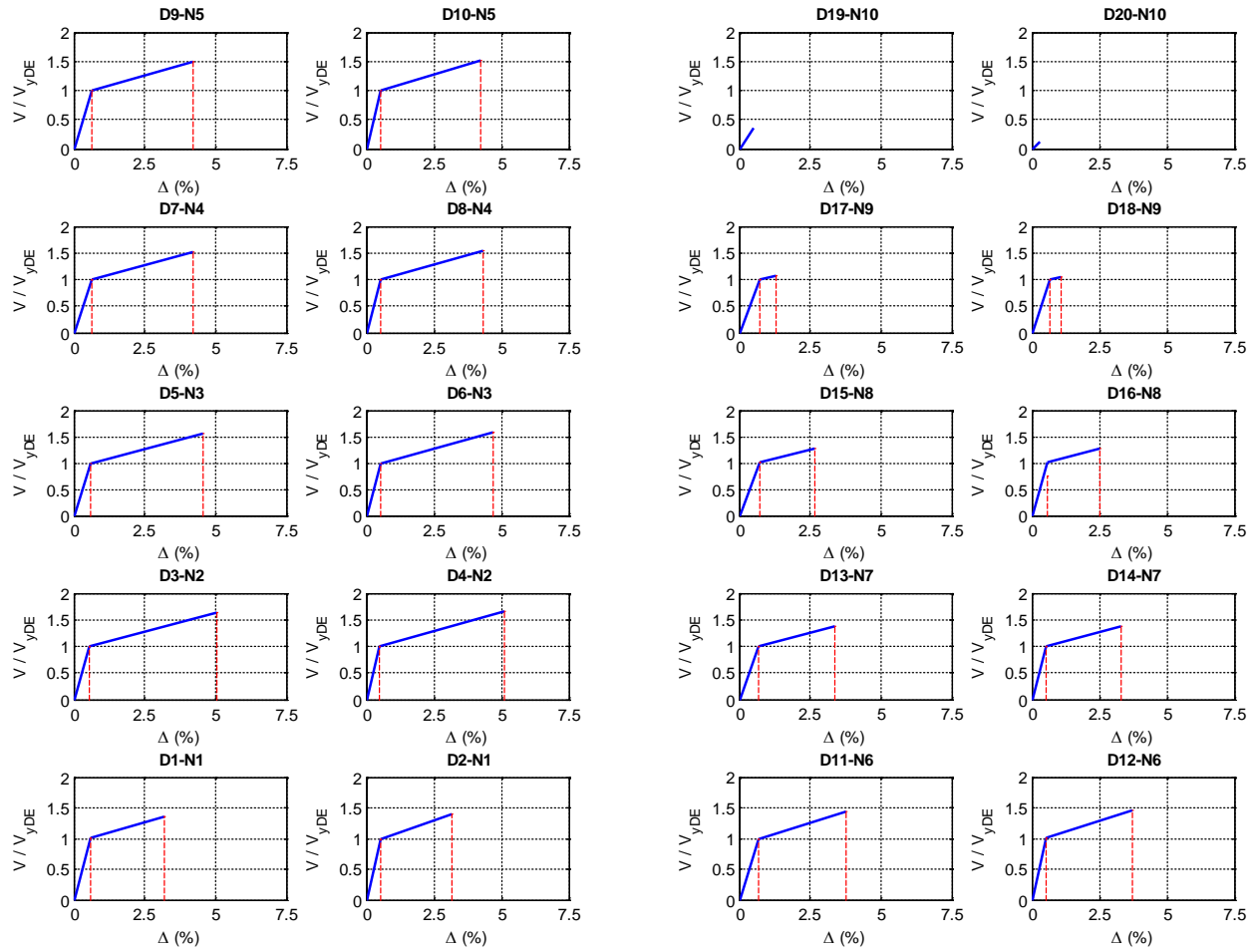


Figura A.96 $N = 10$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

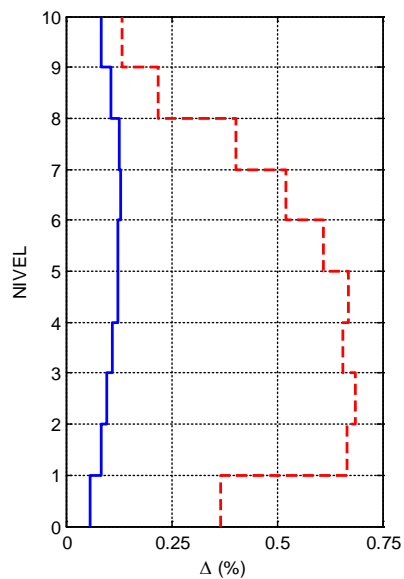
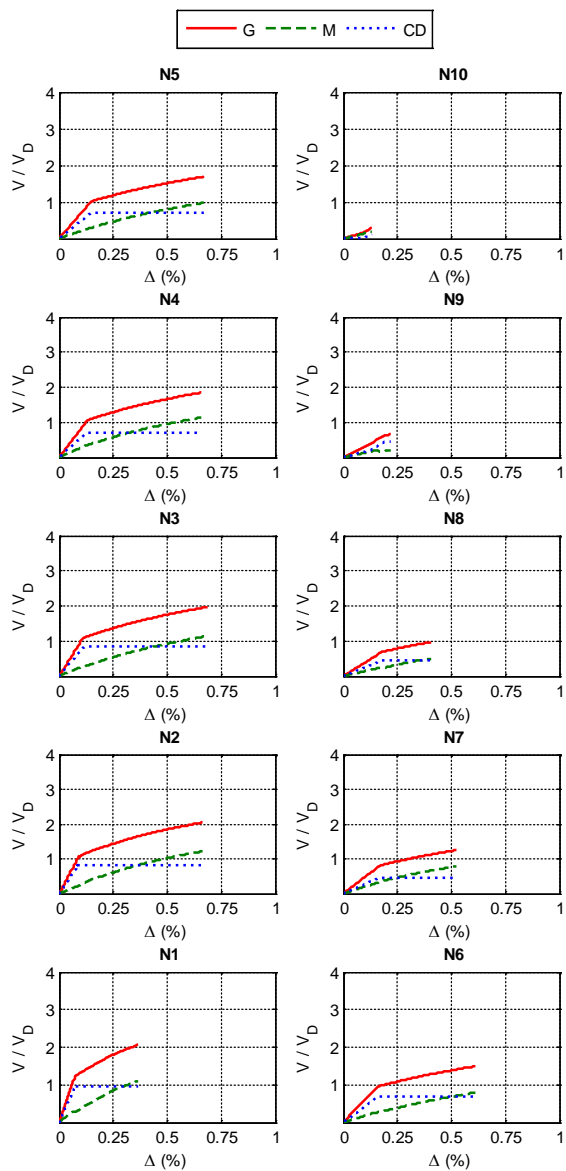
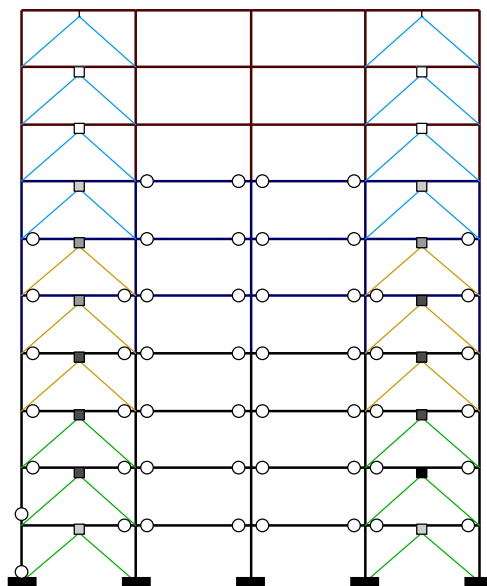
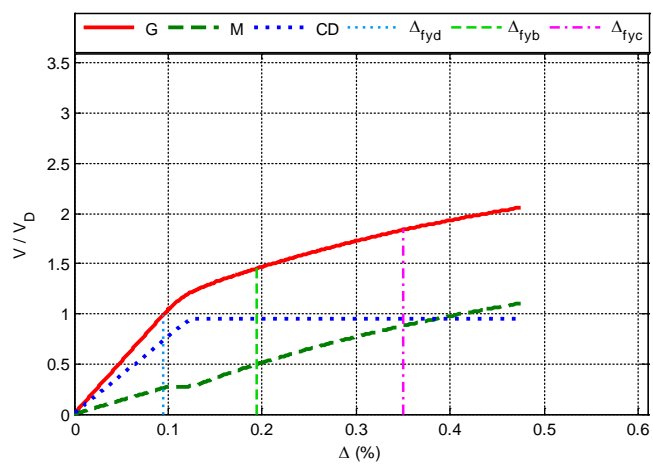


Figura A.97 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

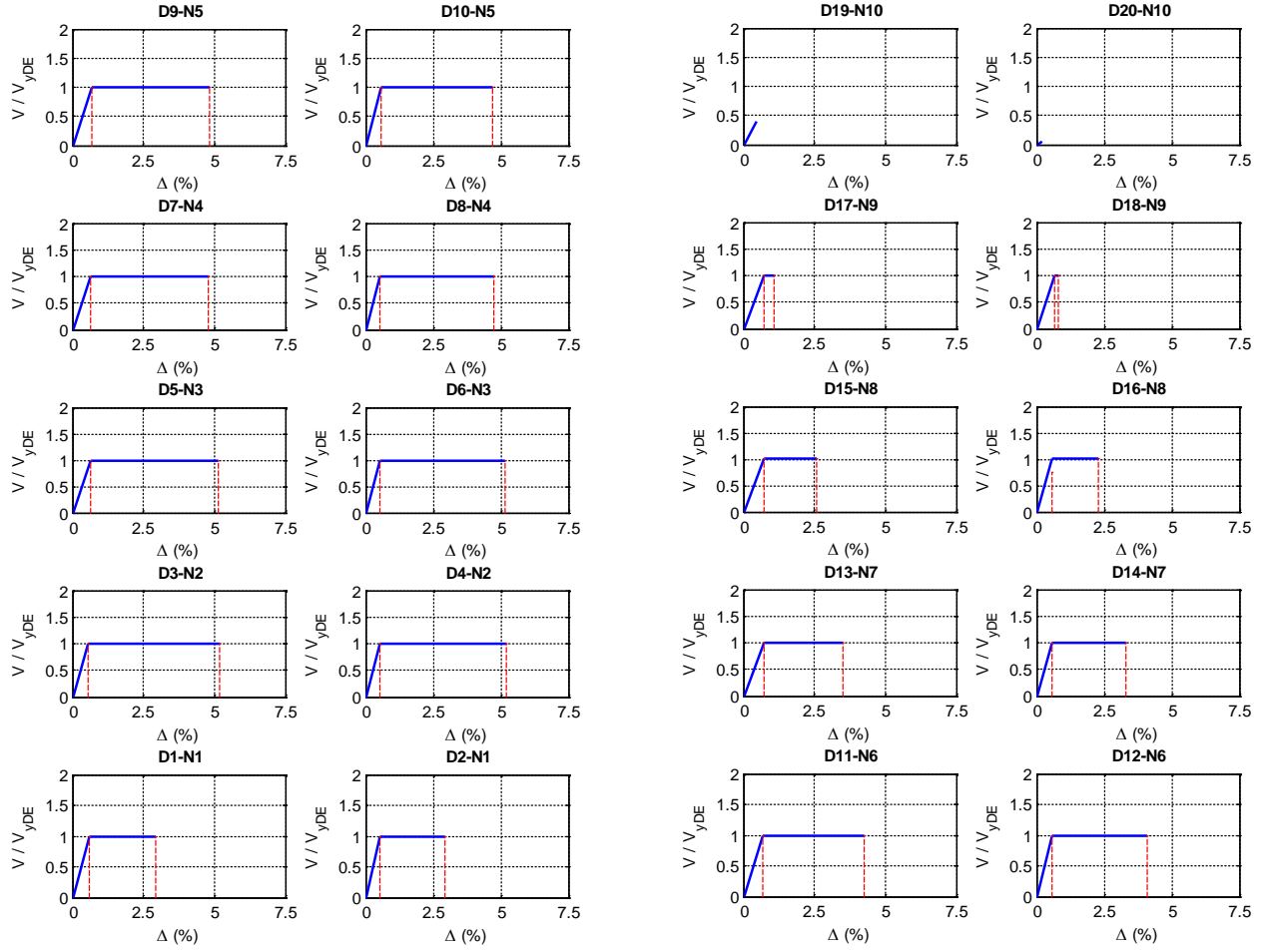


Figura A.98 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

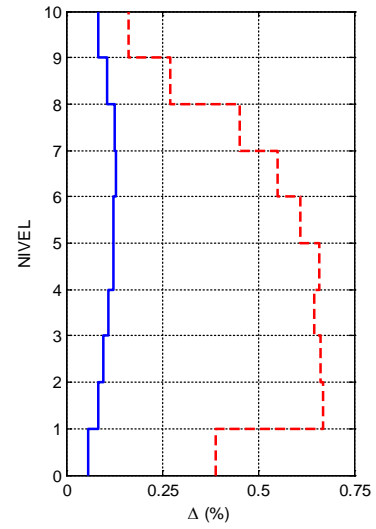
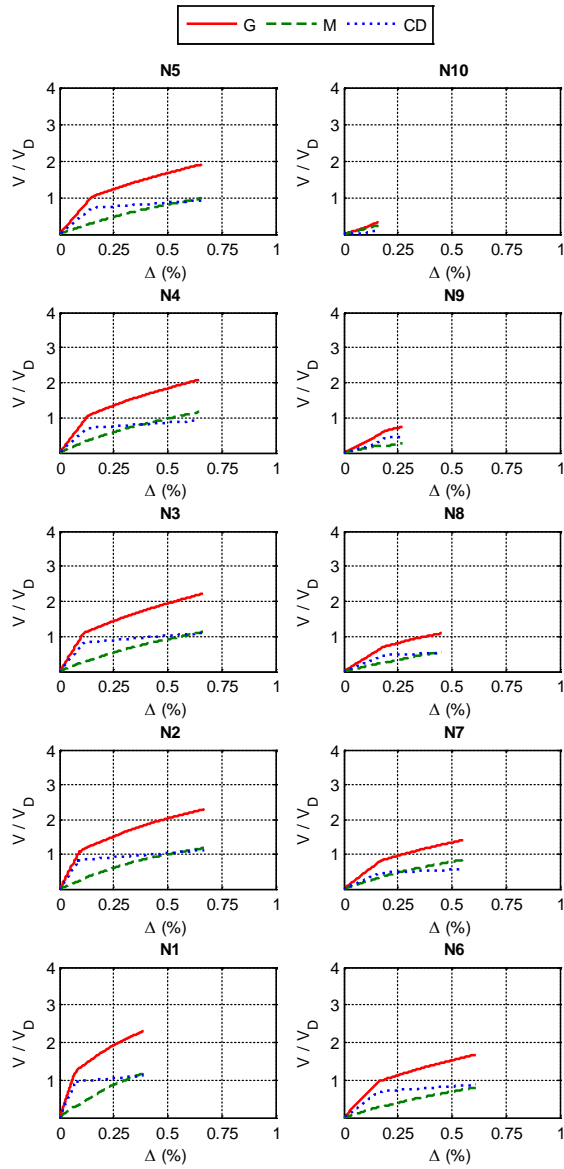
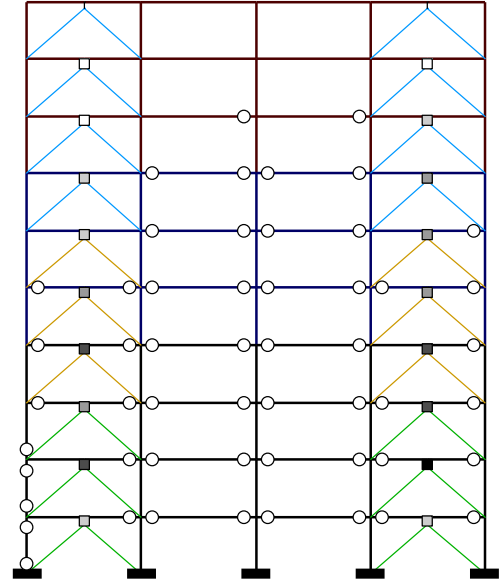
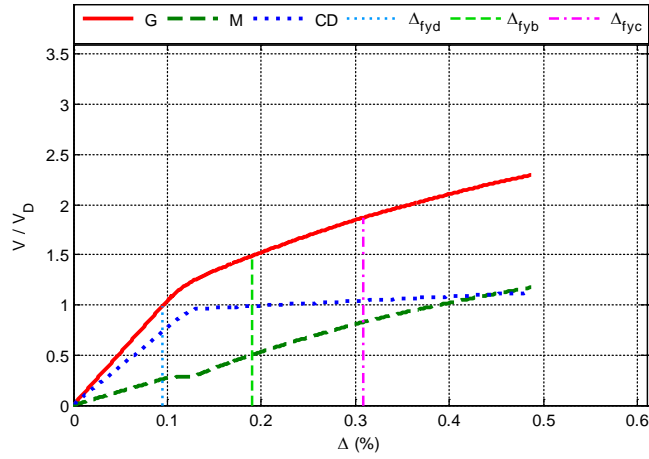


Figura A.99 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

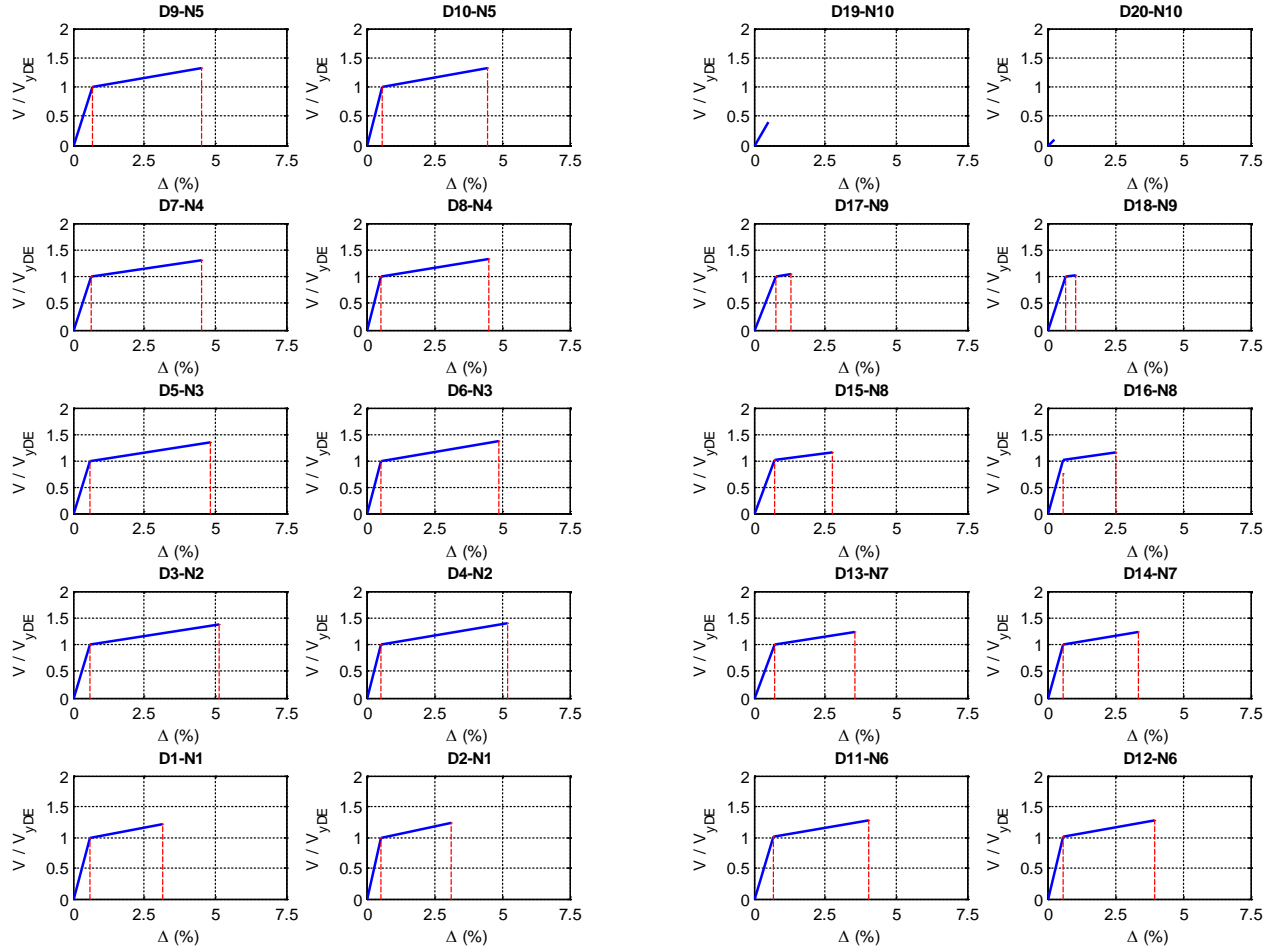
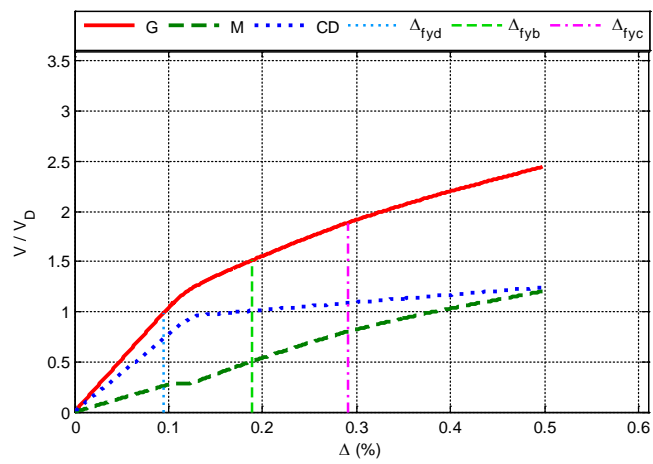


Figura A.100 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$



— G — M ··· CD

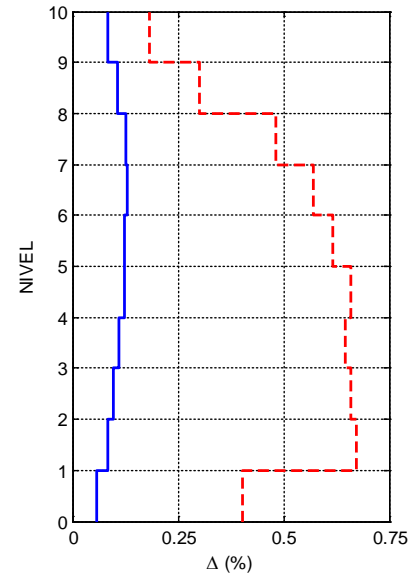
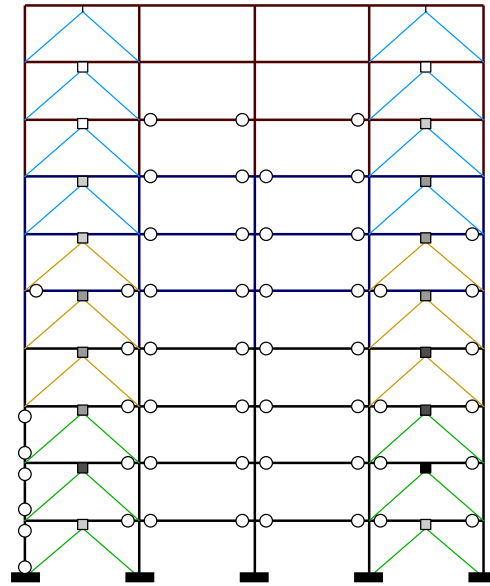
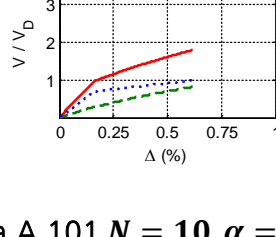
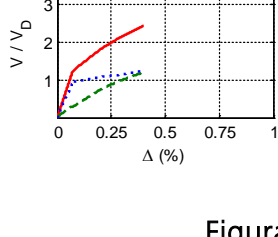
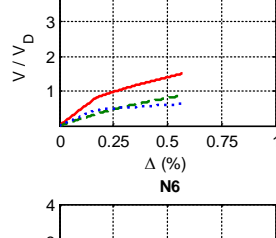
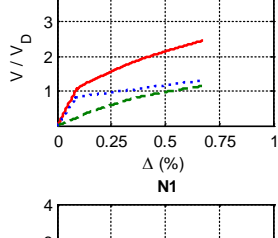
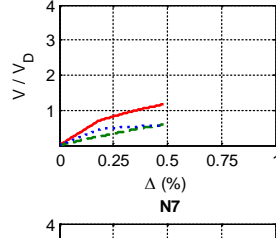
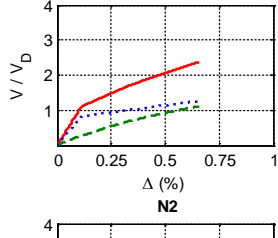
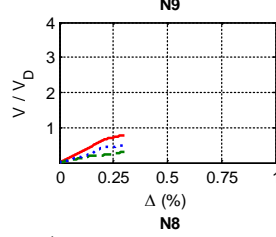
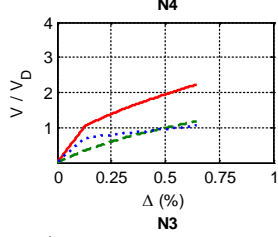
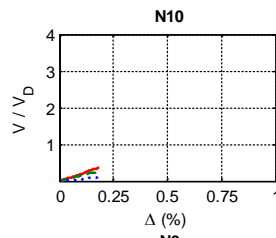
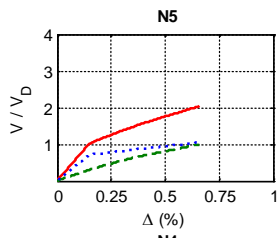


Figura A.101 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

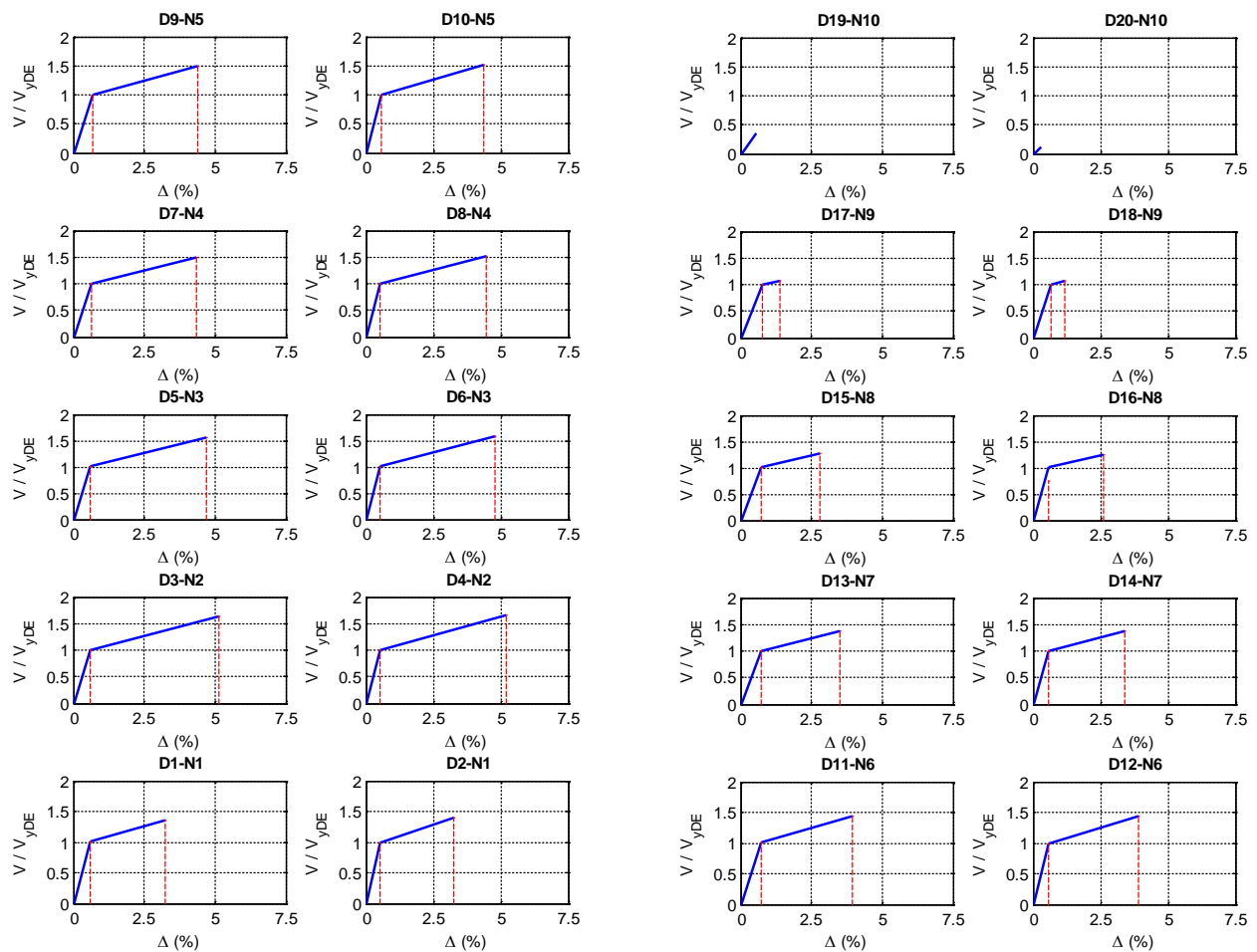
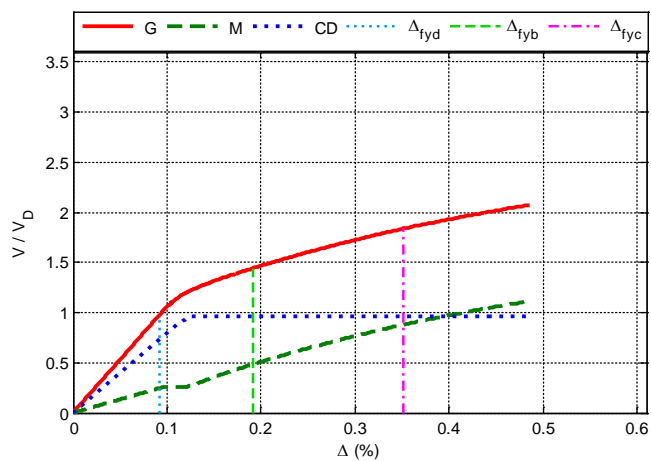


Figura A.102 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$



— G — M ··· CD

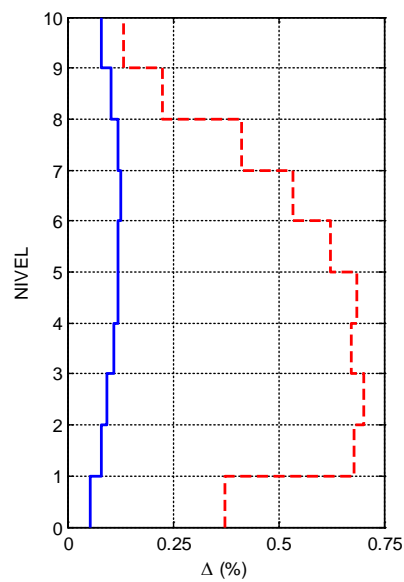
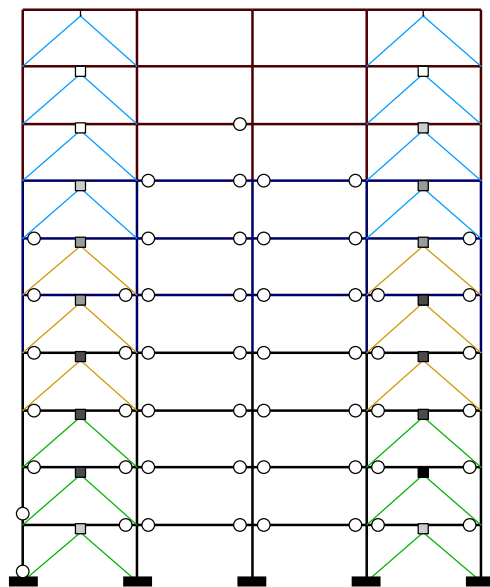
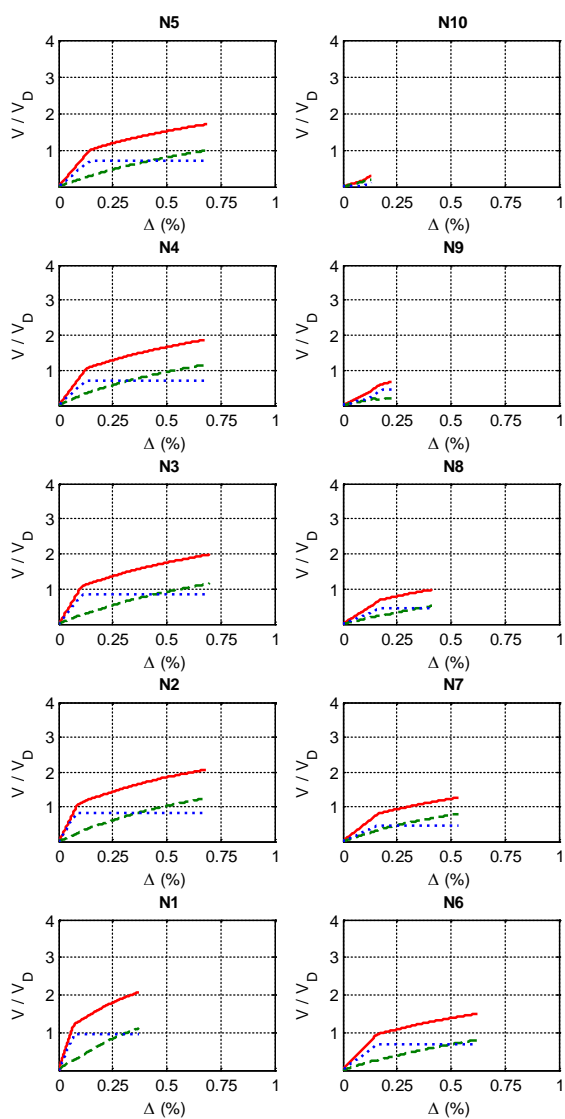


Figura A.103 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

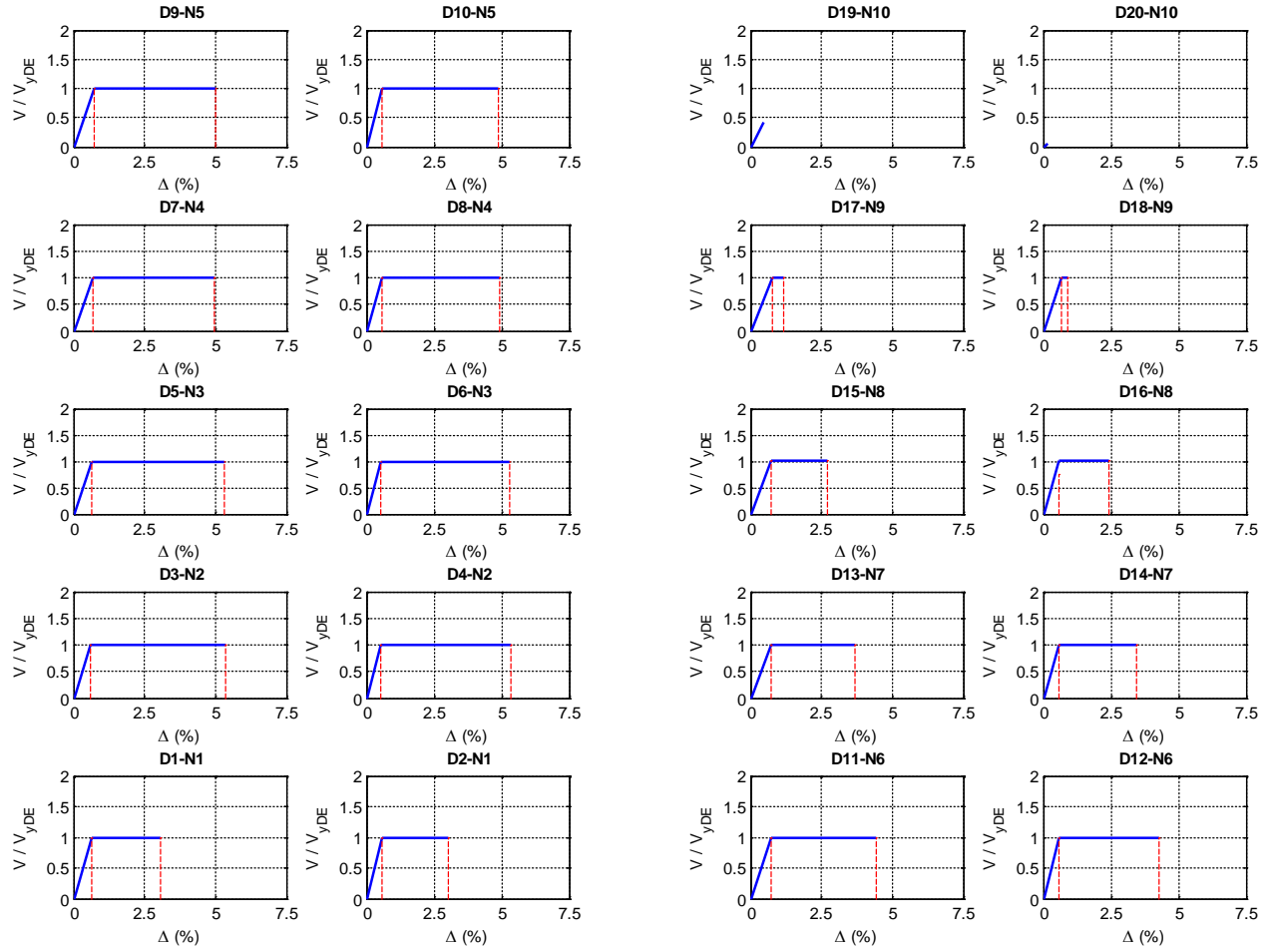


Figura A.104 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

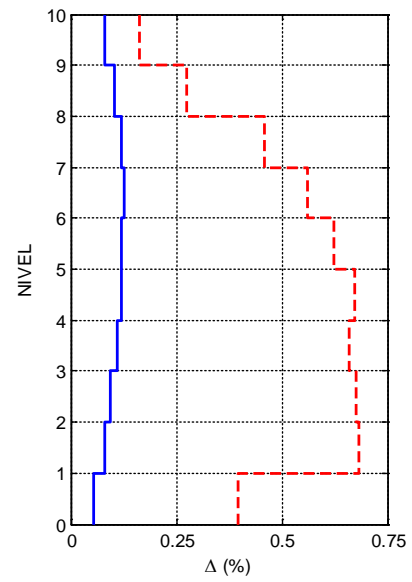
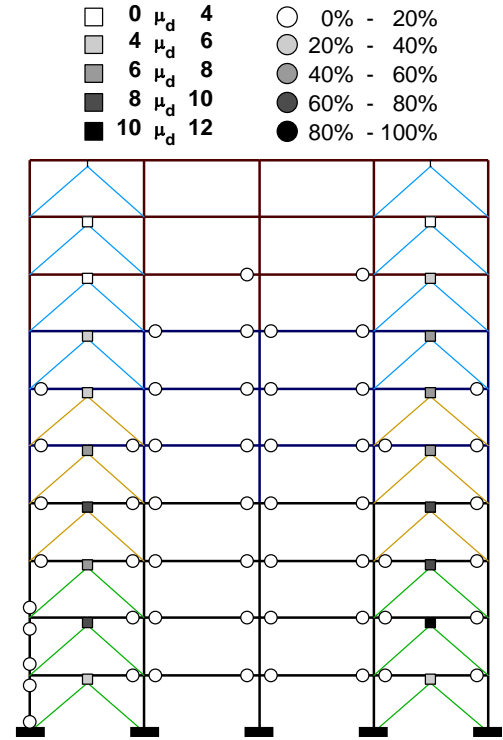
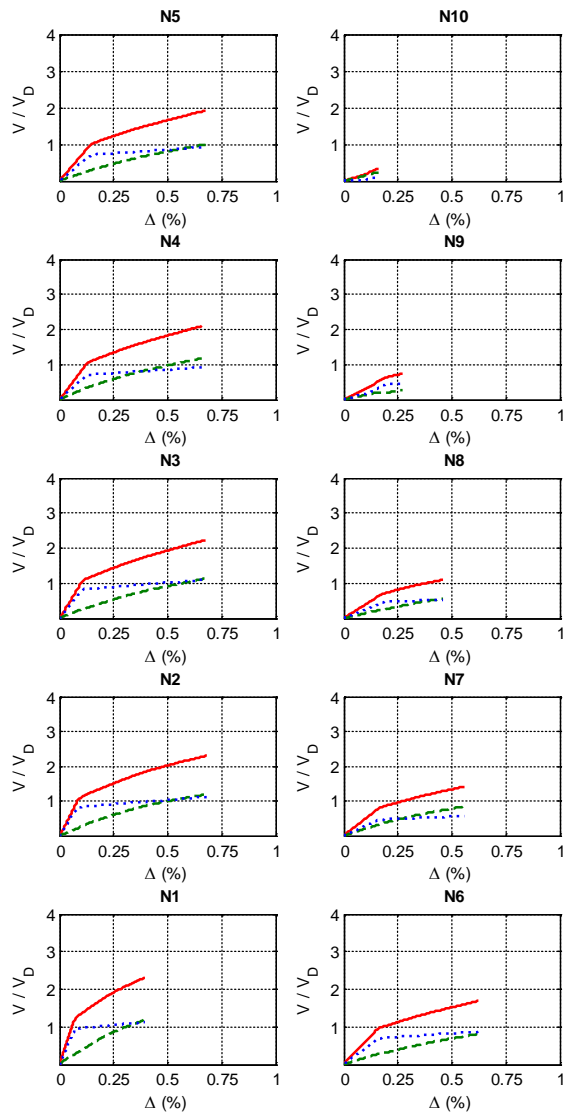
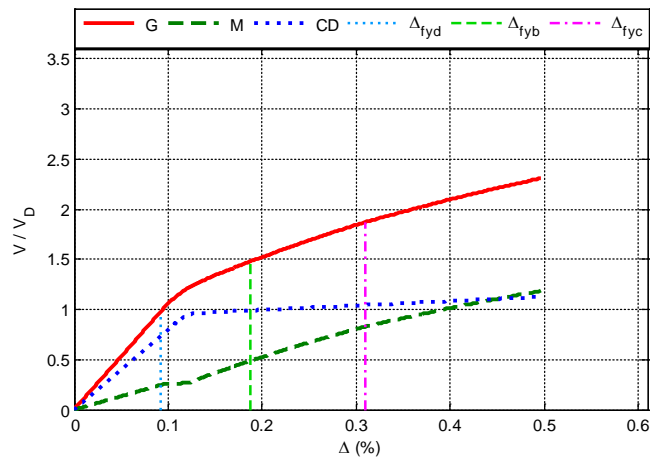


Figura A.105 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

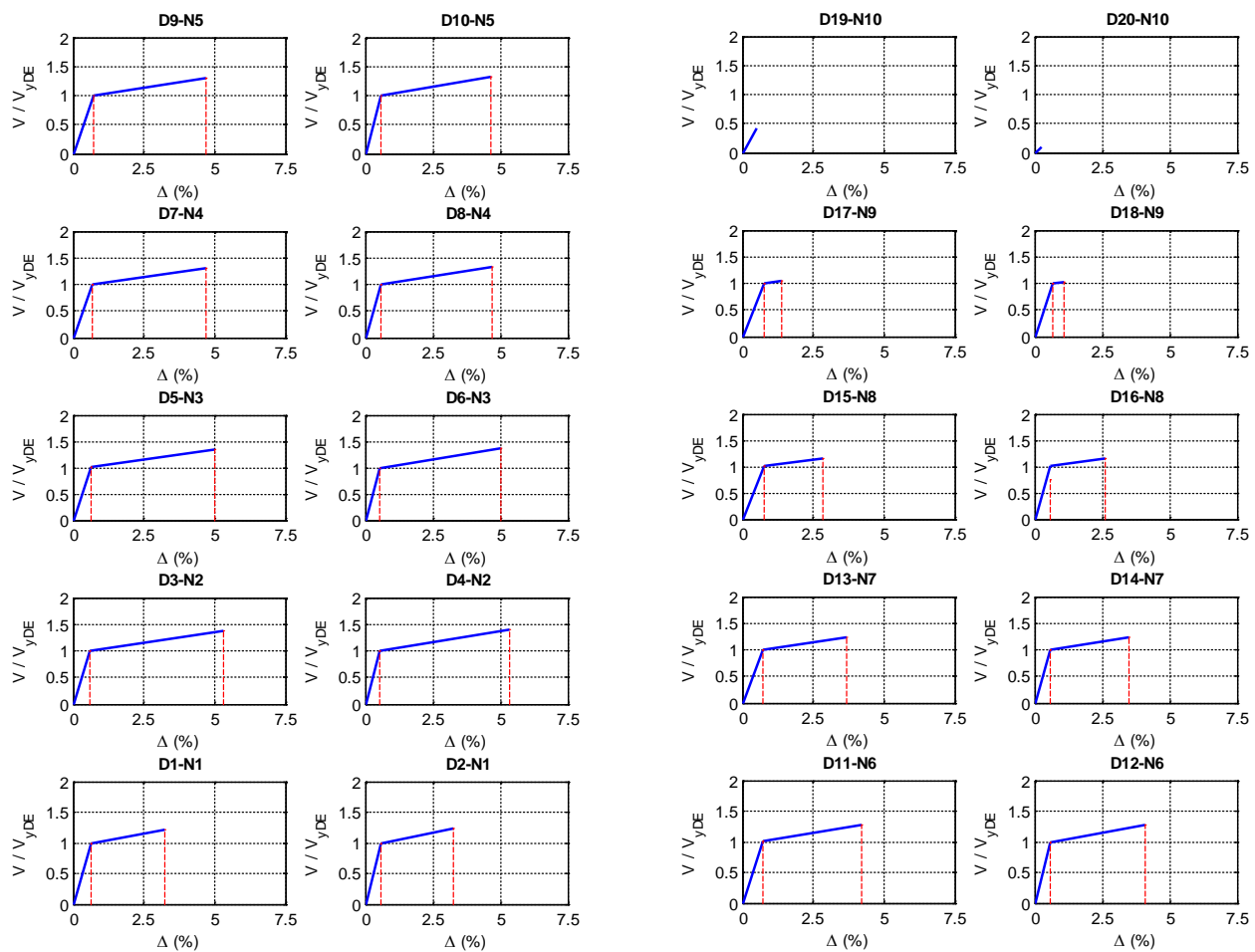


Figura A.106 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

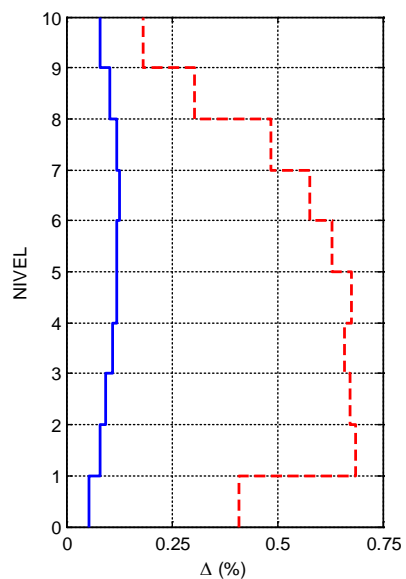
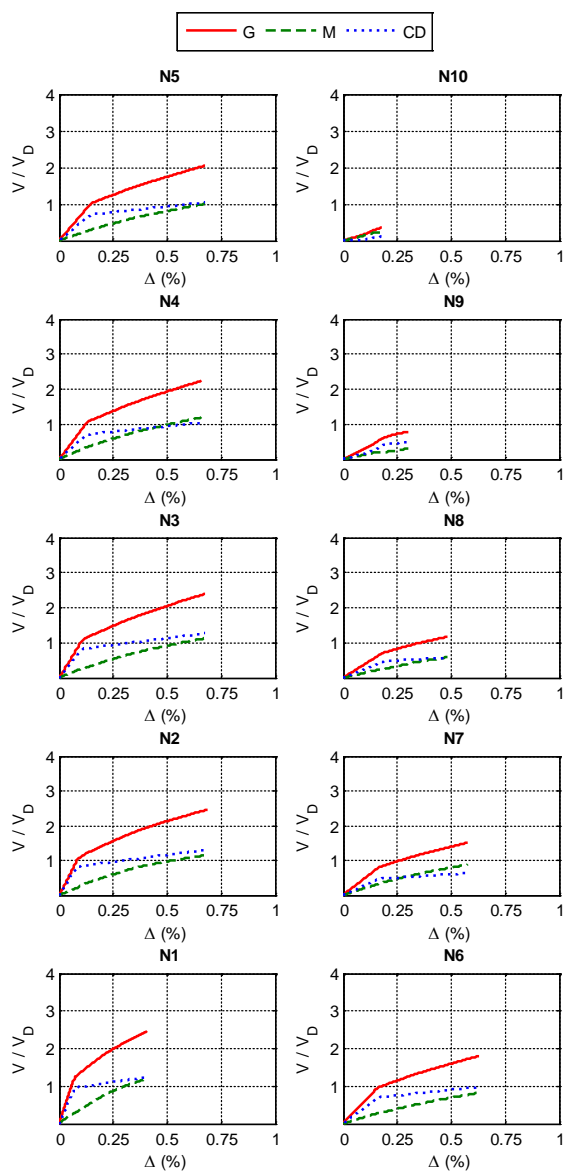
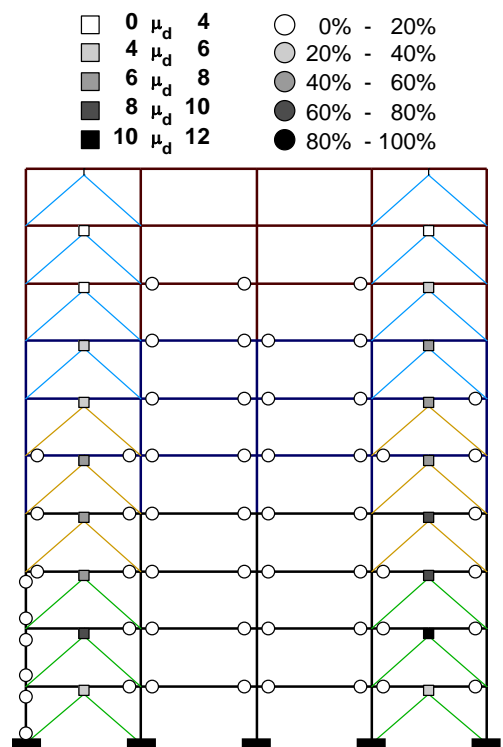
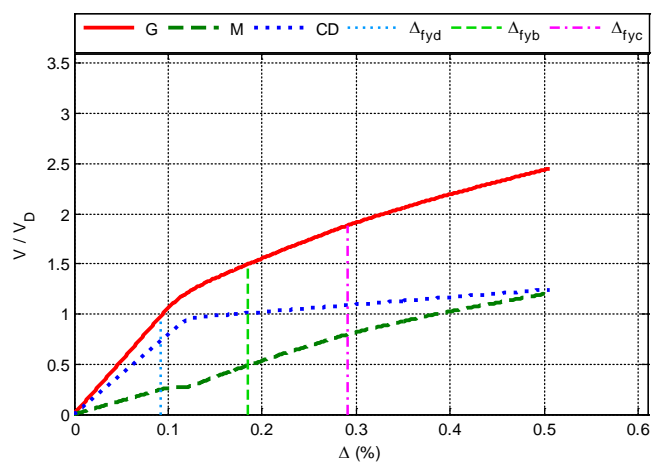


Figura A.107 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

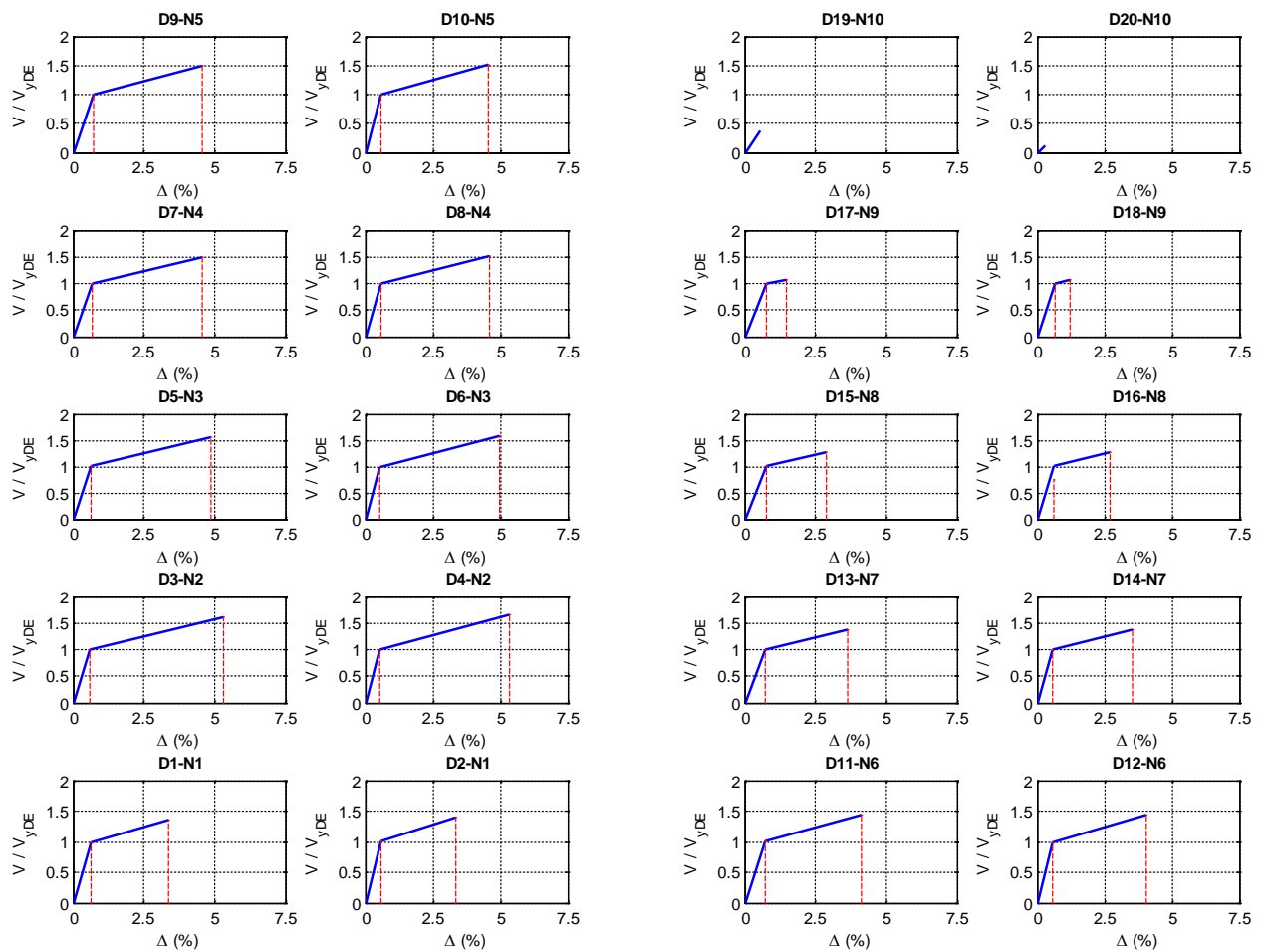


Figura A.108 $N = 10, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

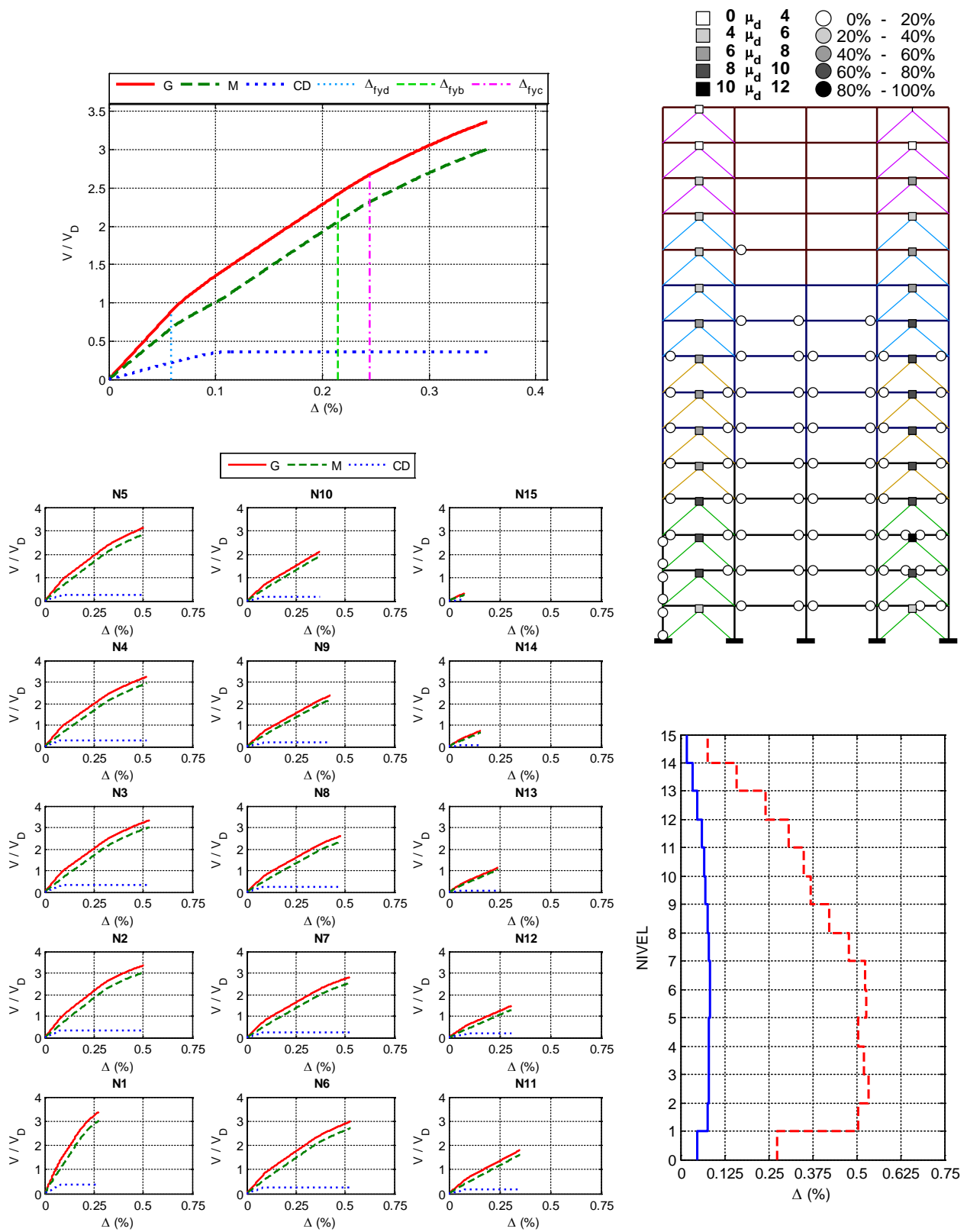


Figura A.109 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

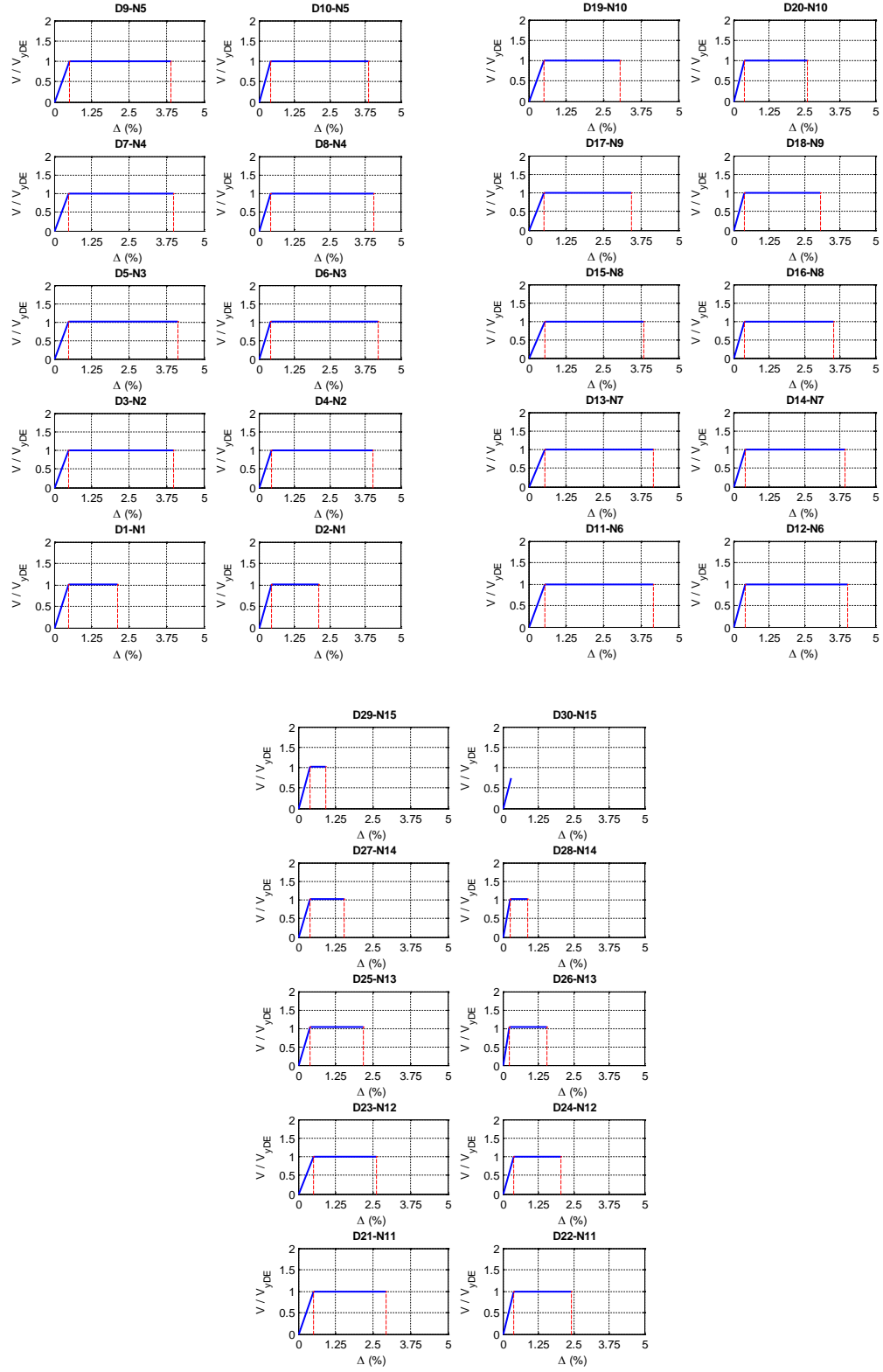


Figura A.110 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

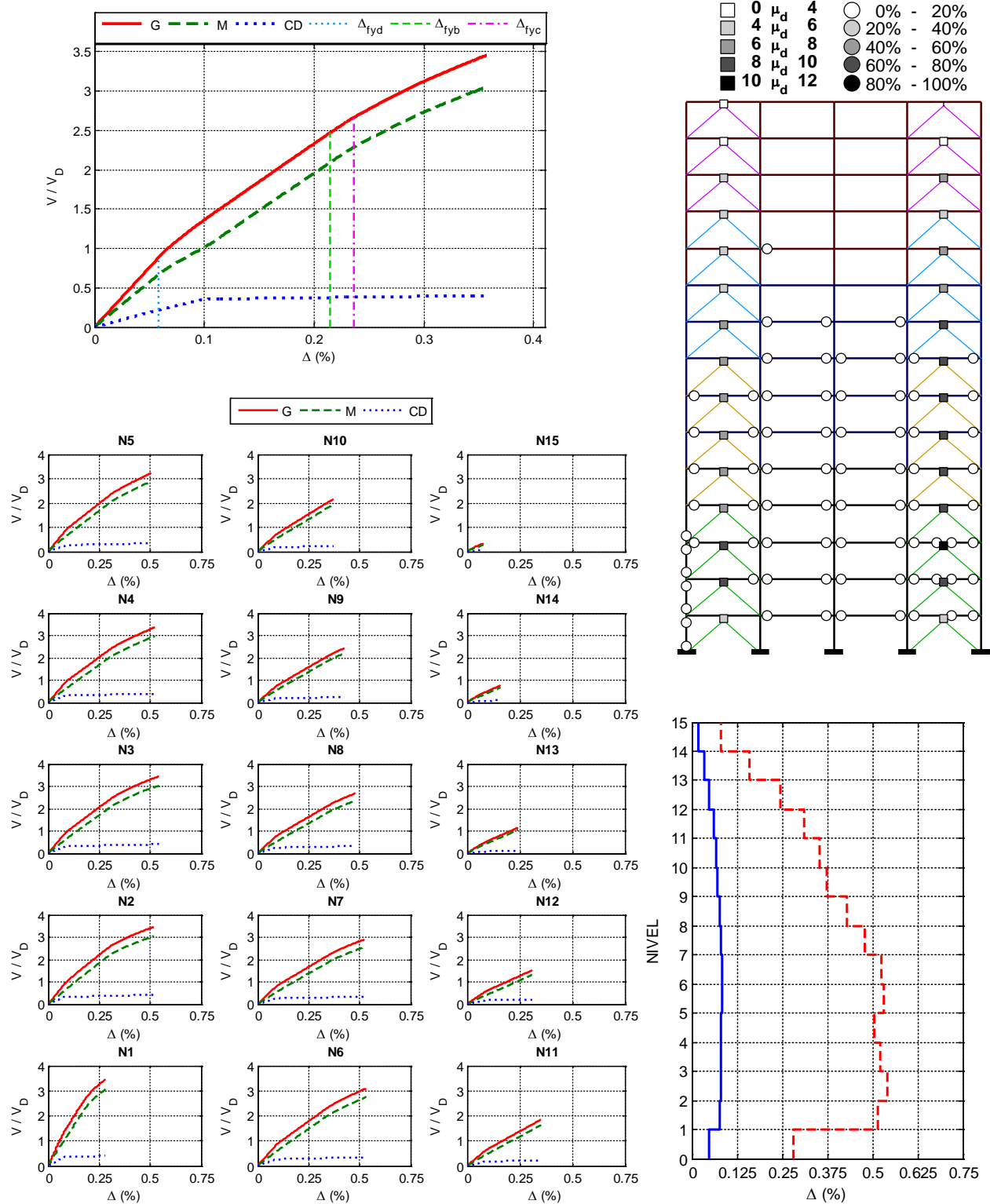


Figura A.111 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

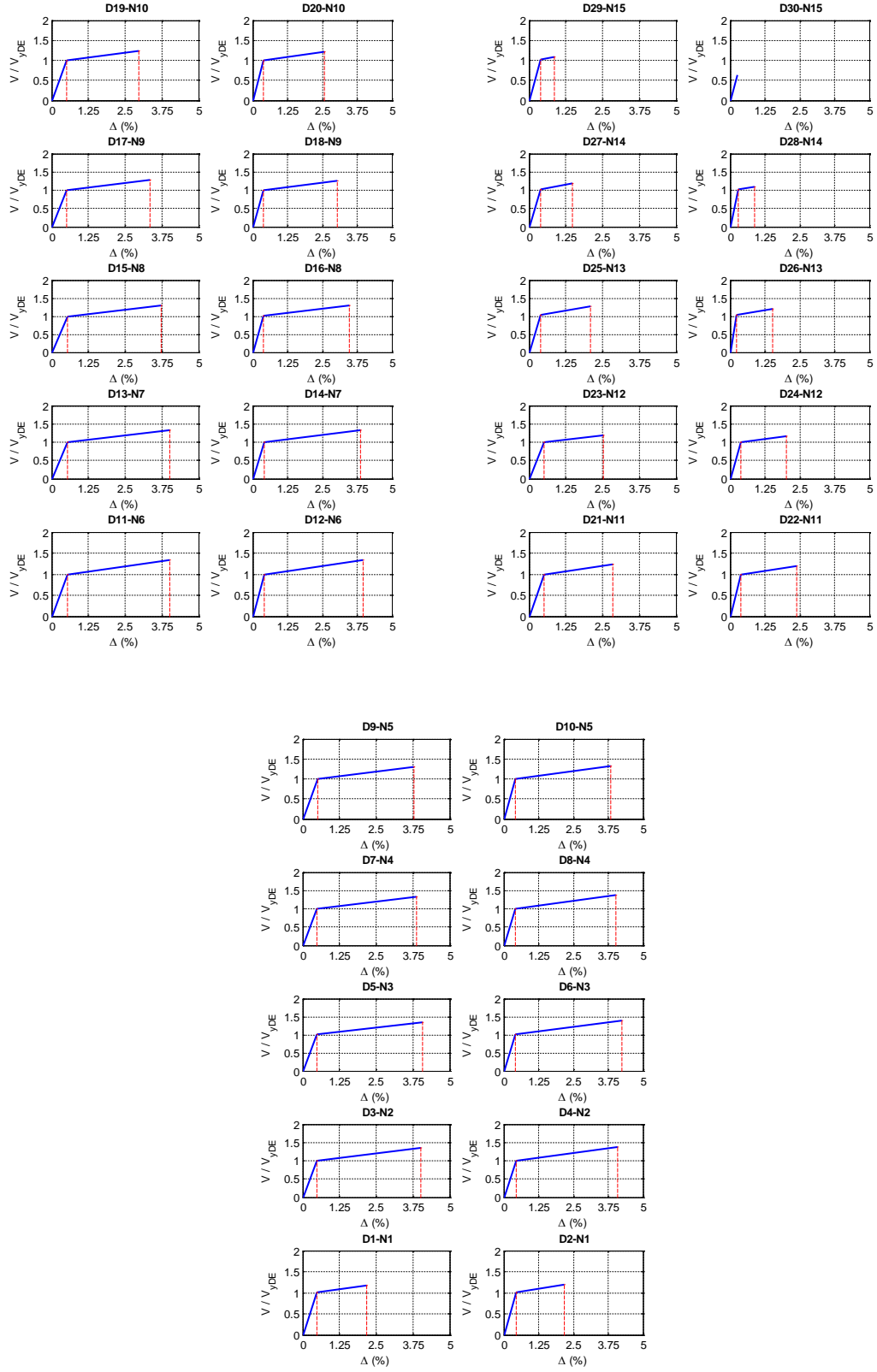


Figura A.112 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

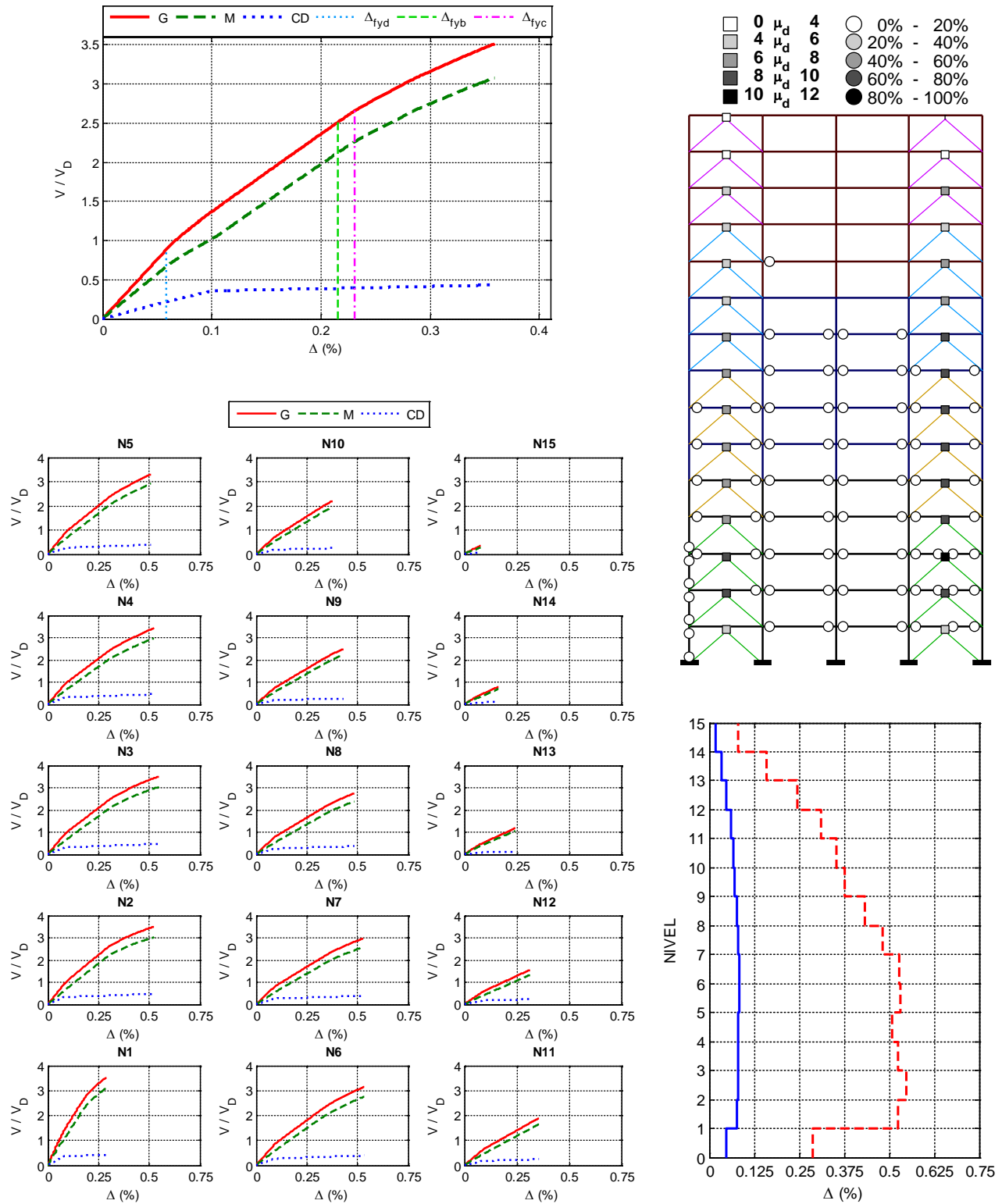


Figura A.113 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

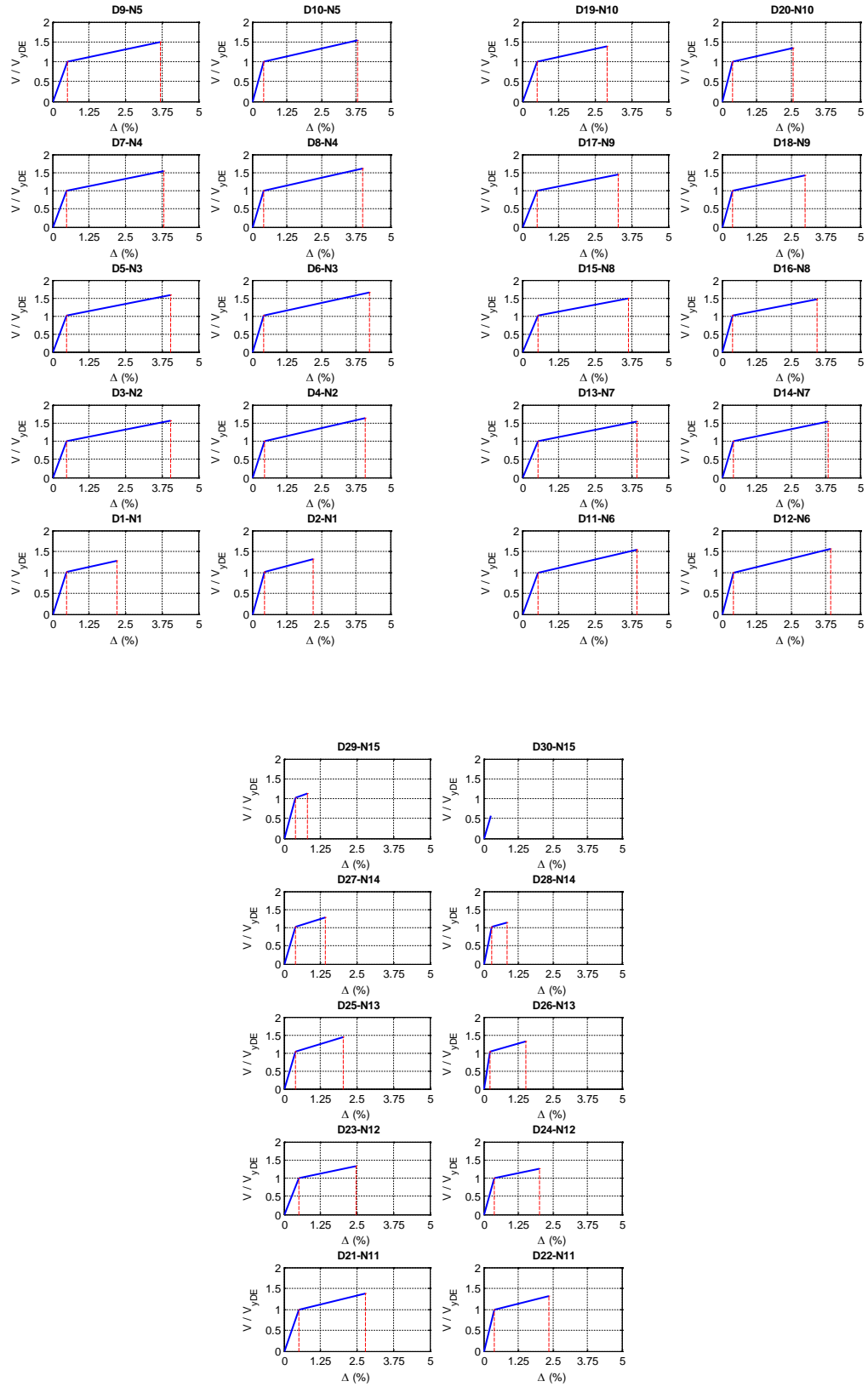


Figura A.114 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

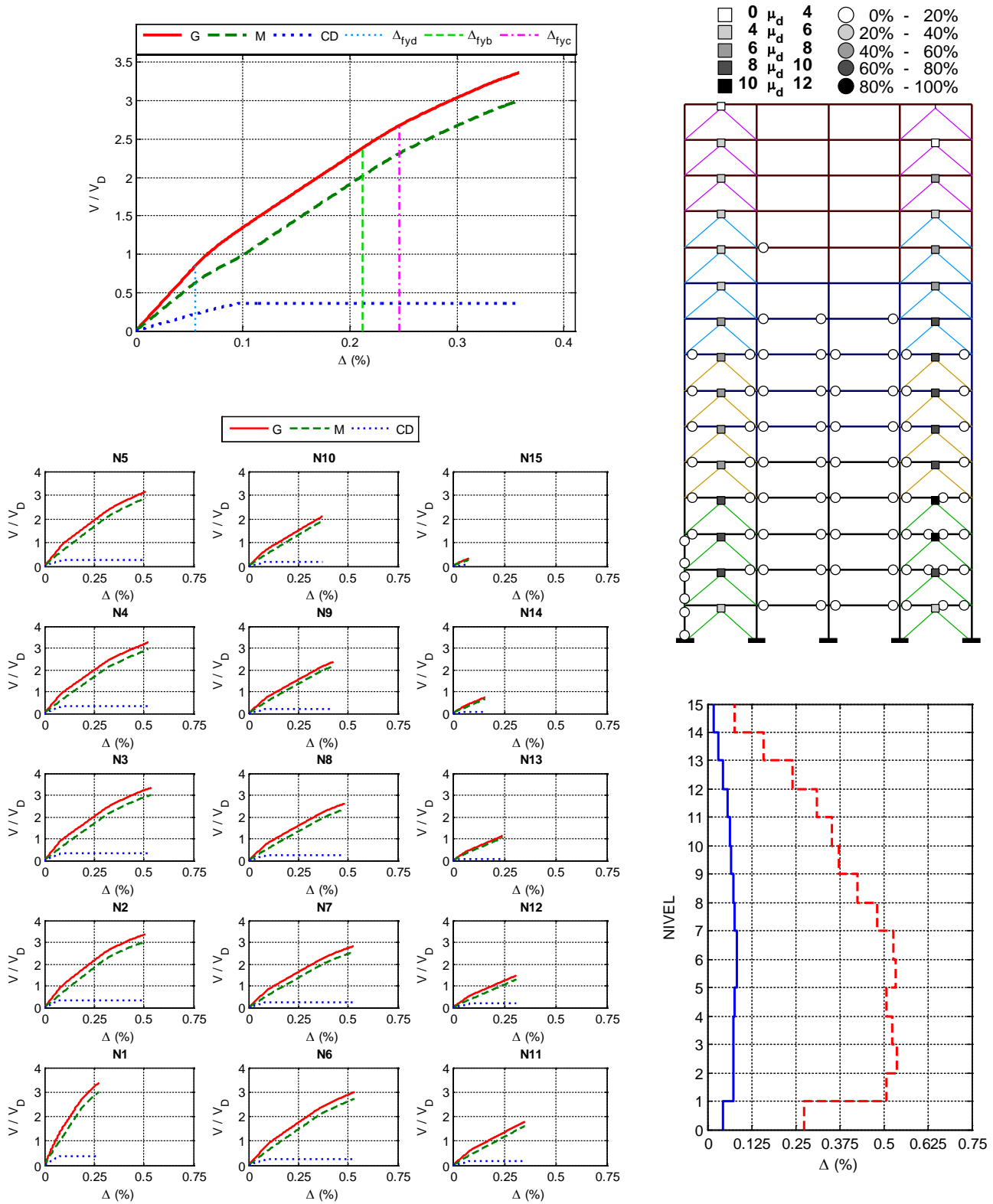


Figura A.115 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

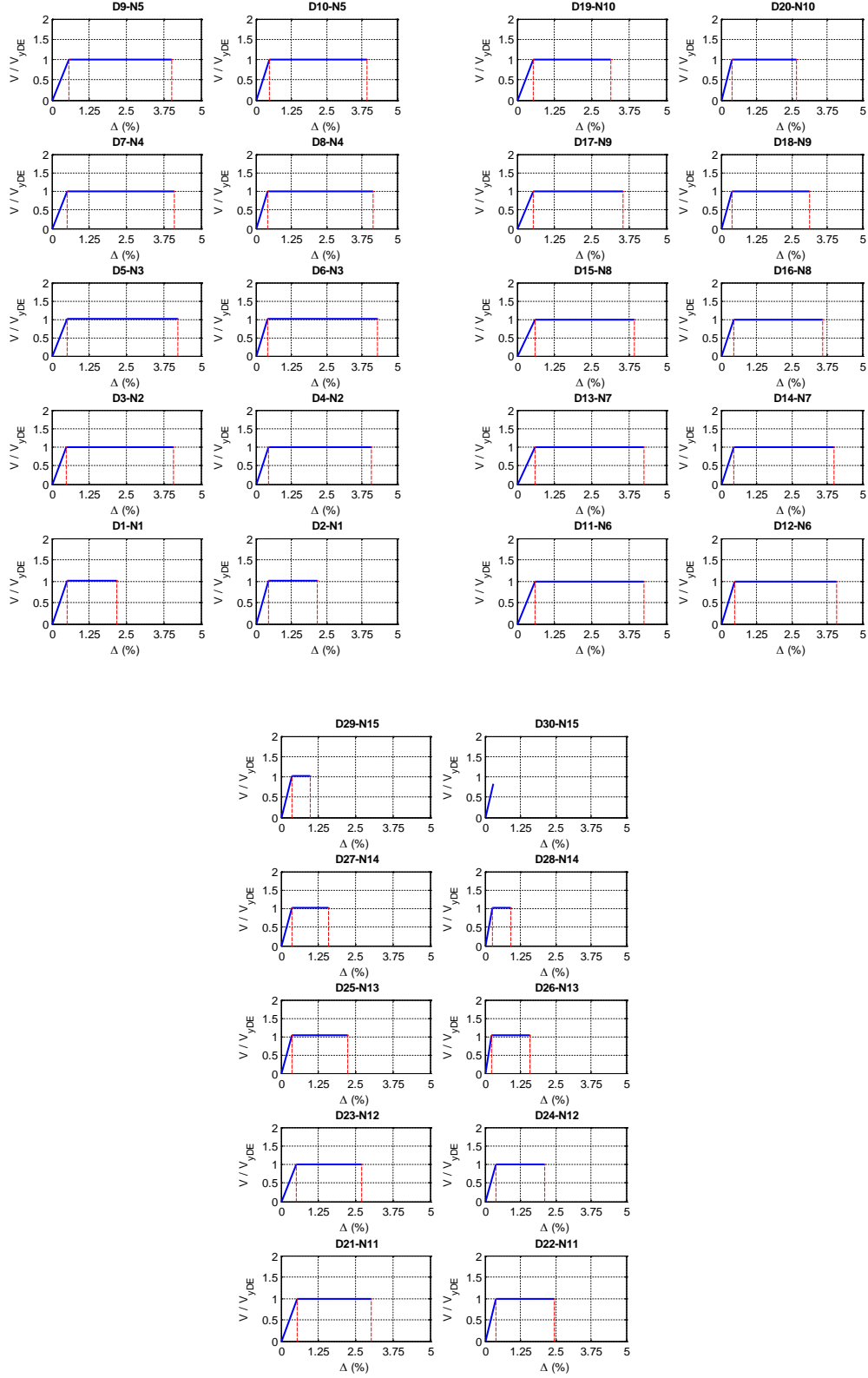


Figura A.116 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

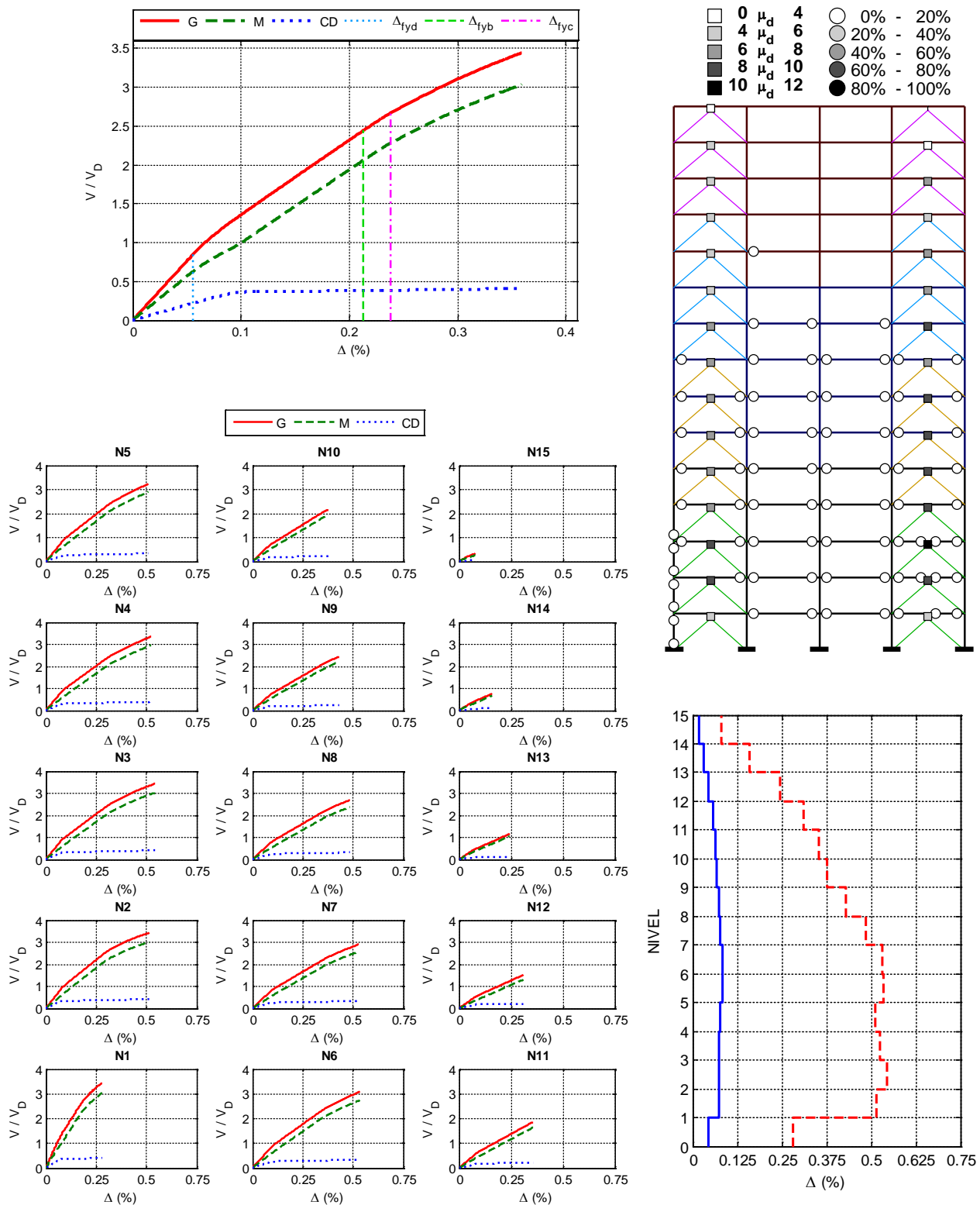


Figura A.117 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

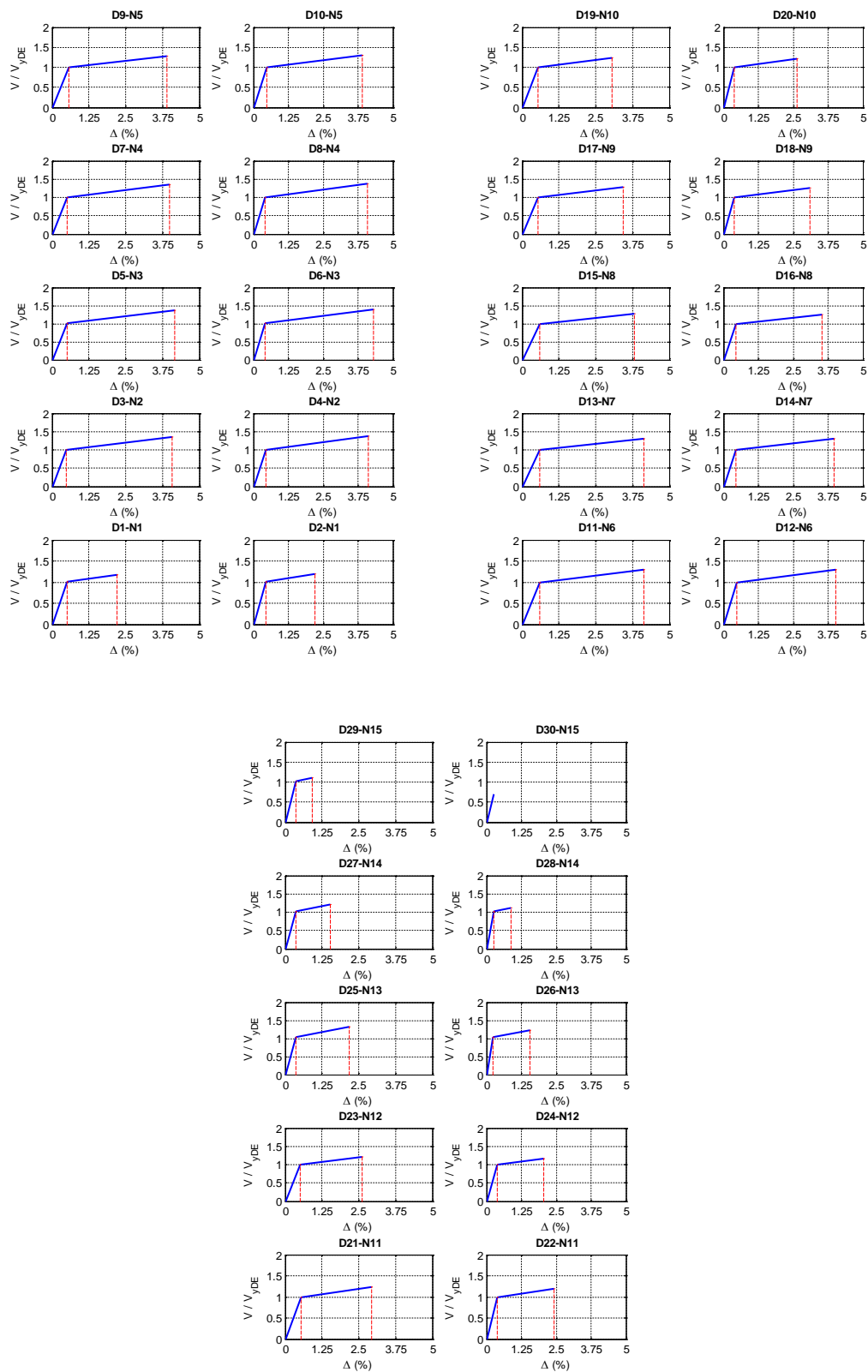


Figura A.118 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

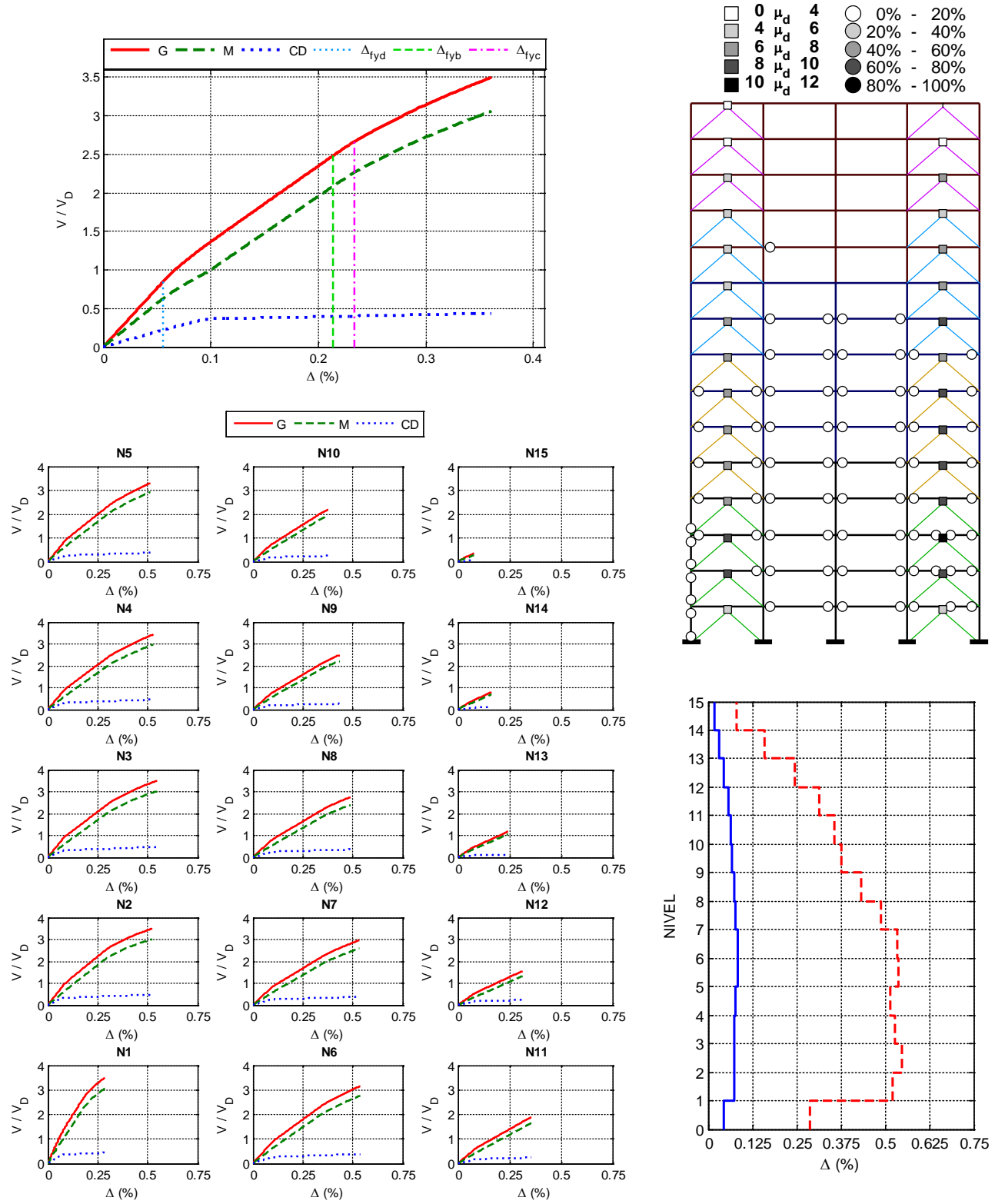


Figura A.119 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

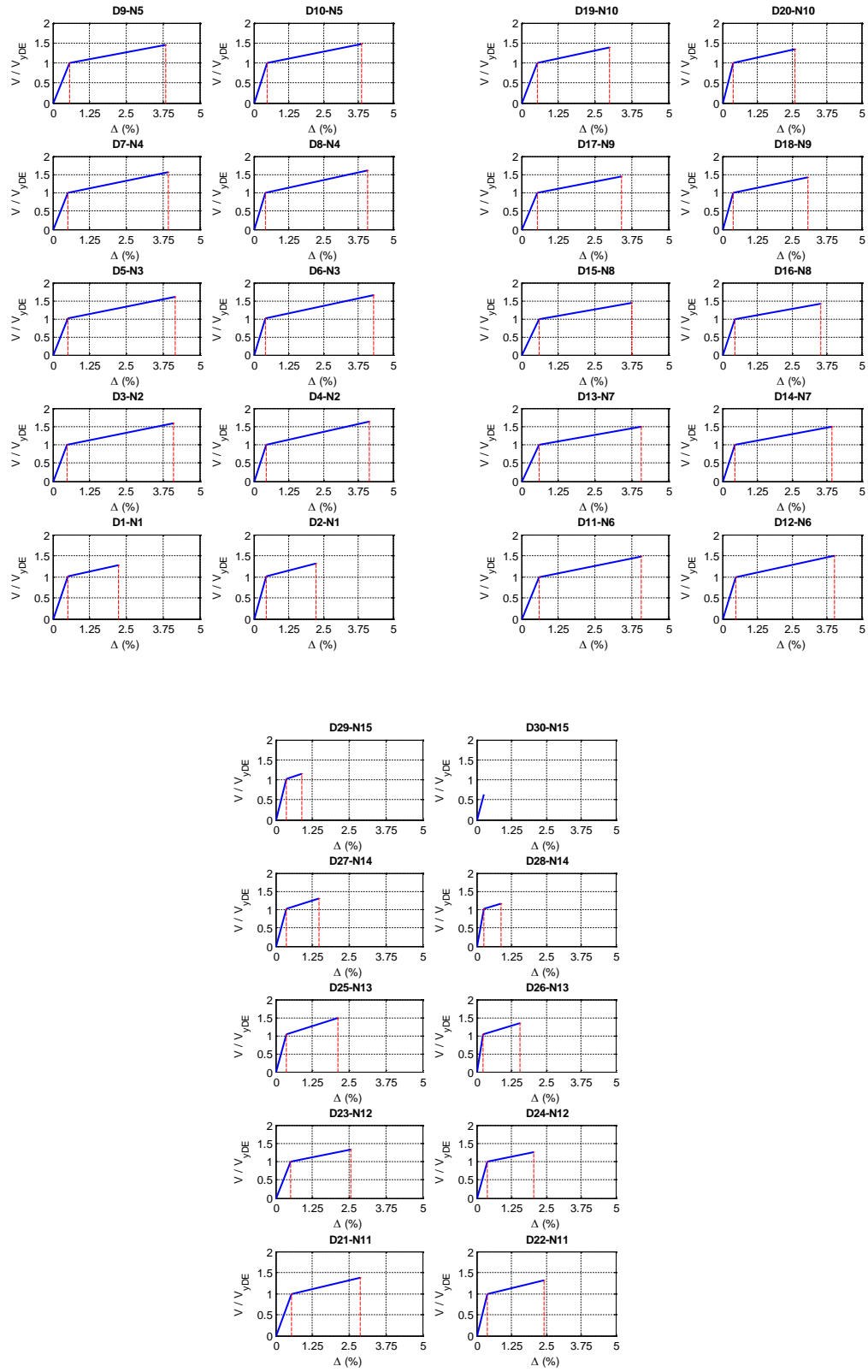


Figura A.120 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

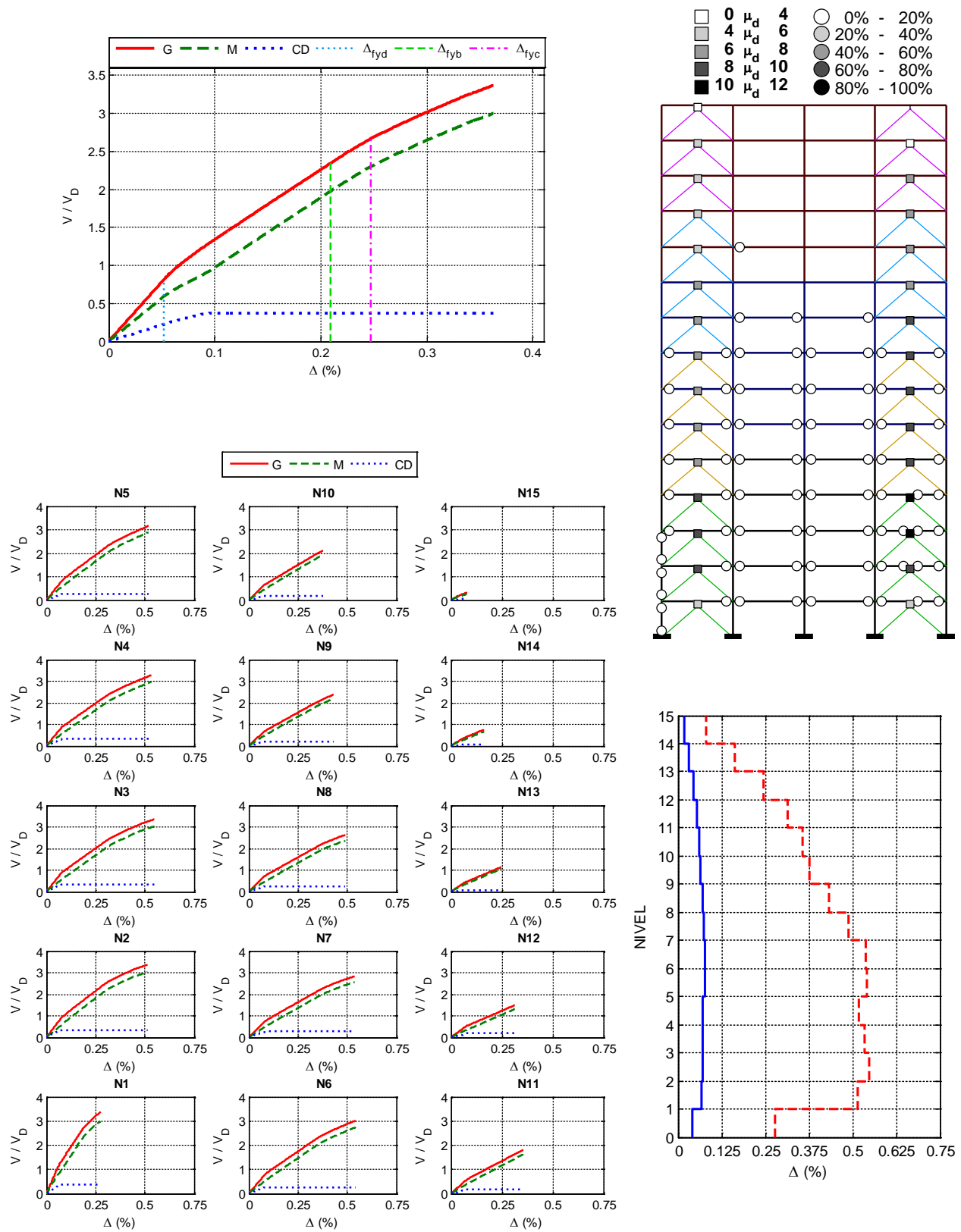


Figura A.121 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

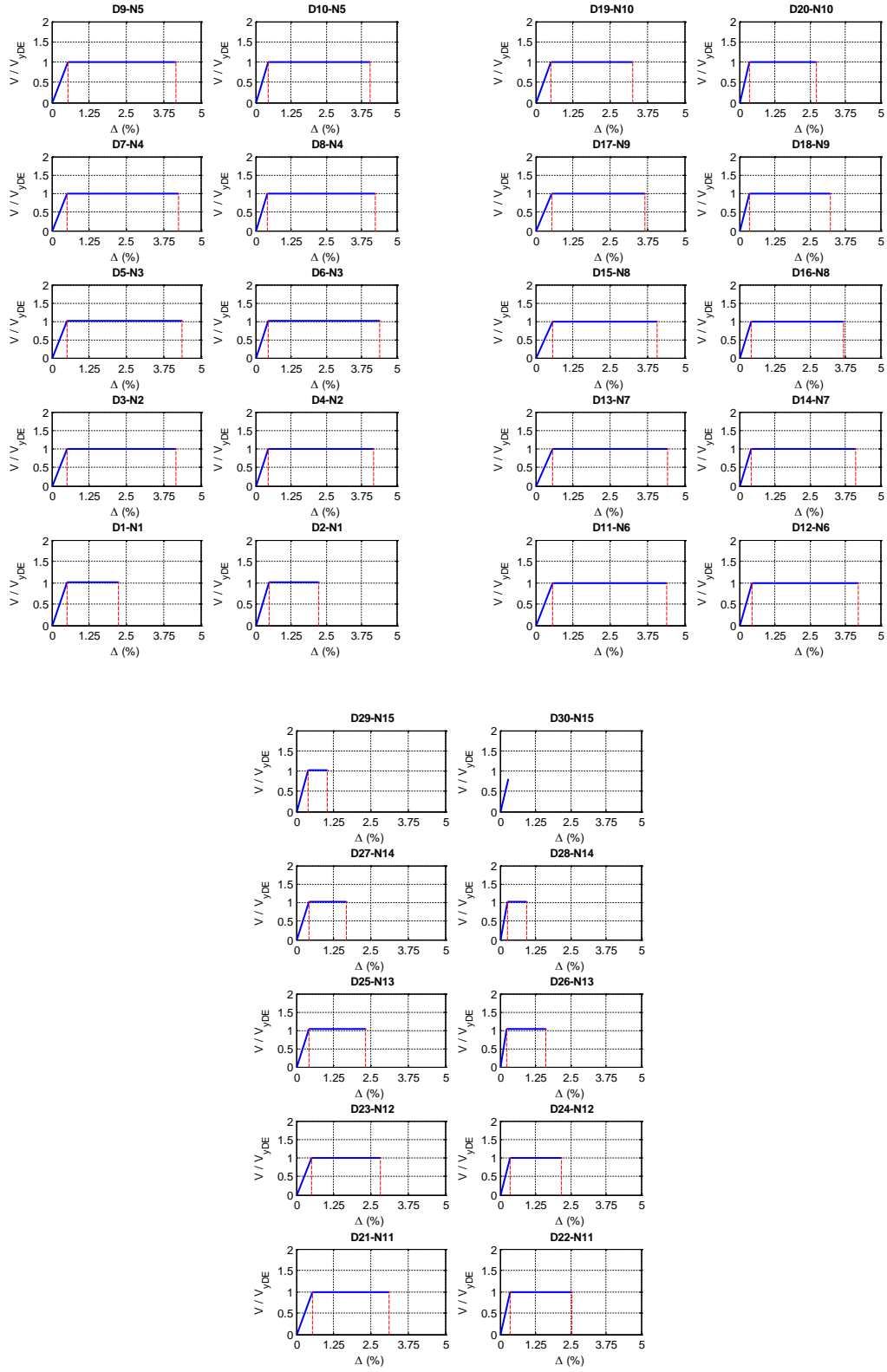


Figura A.122 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

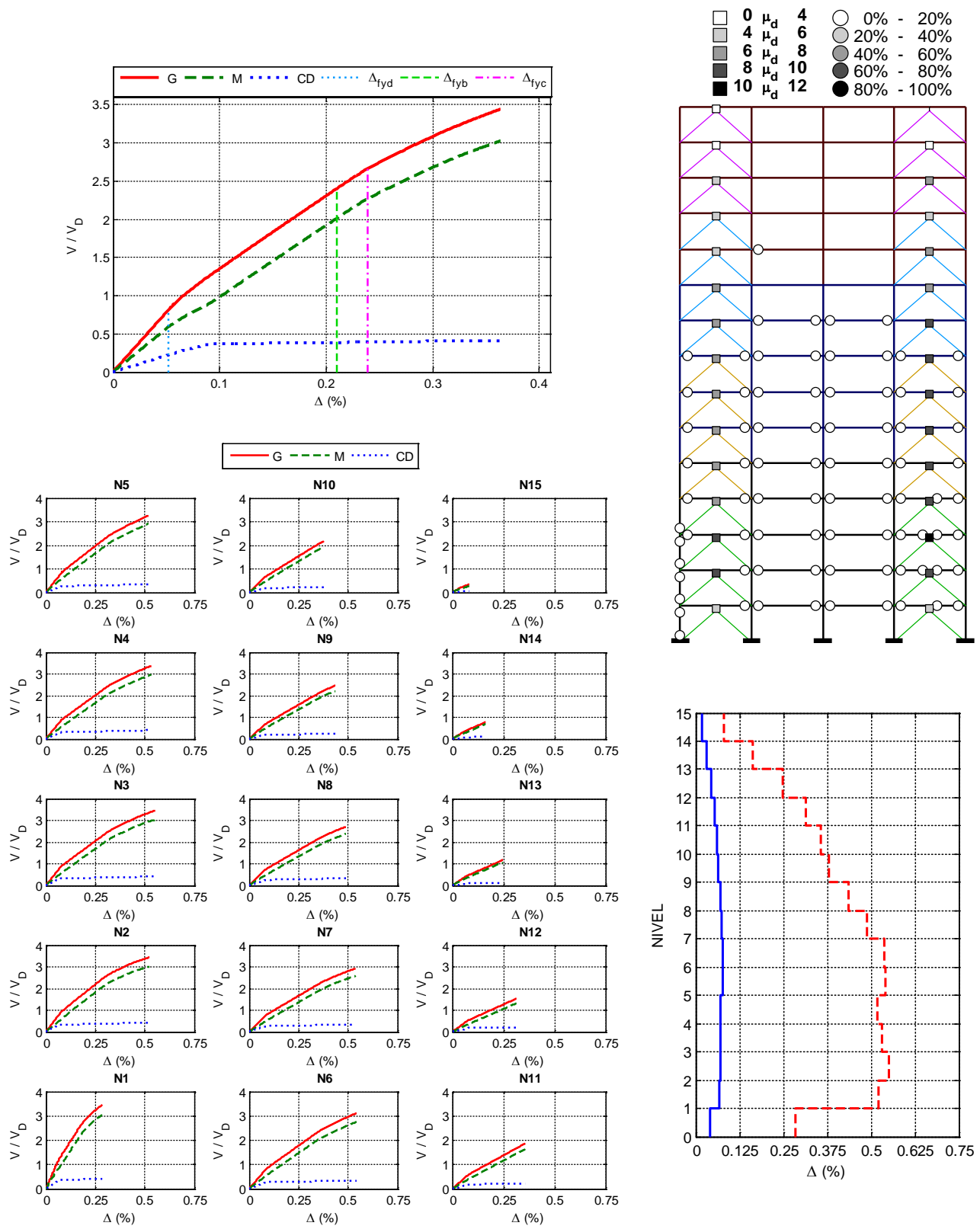


Figura A.123 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

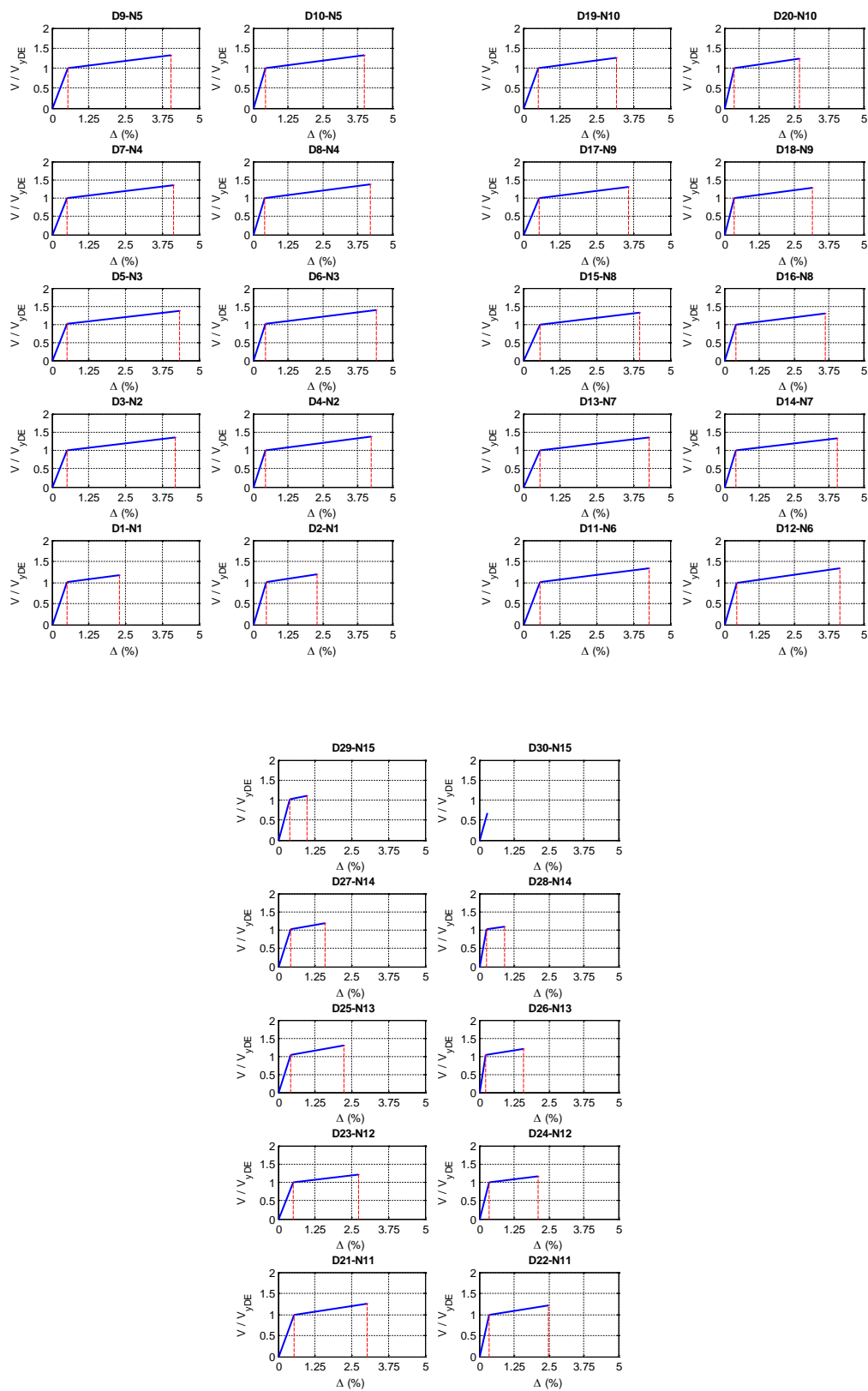


Figura A.124 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

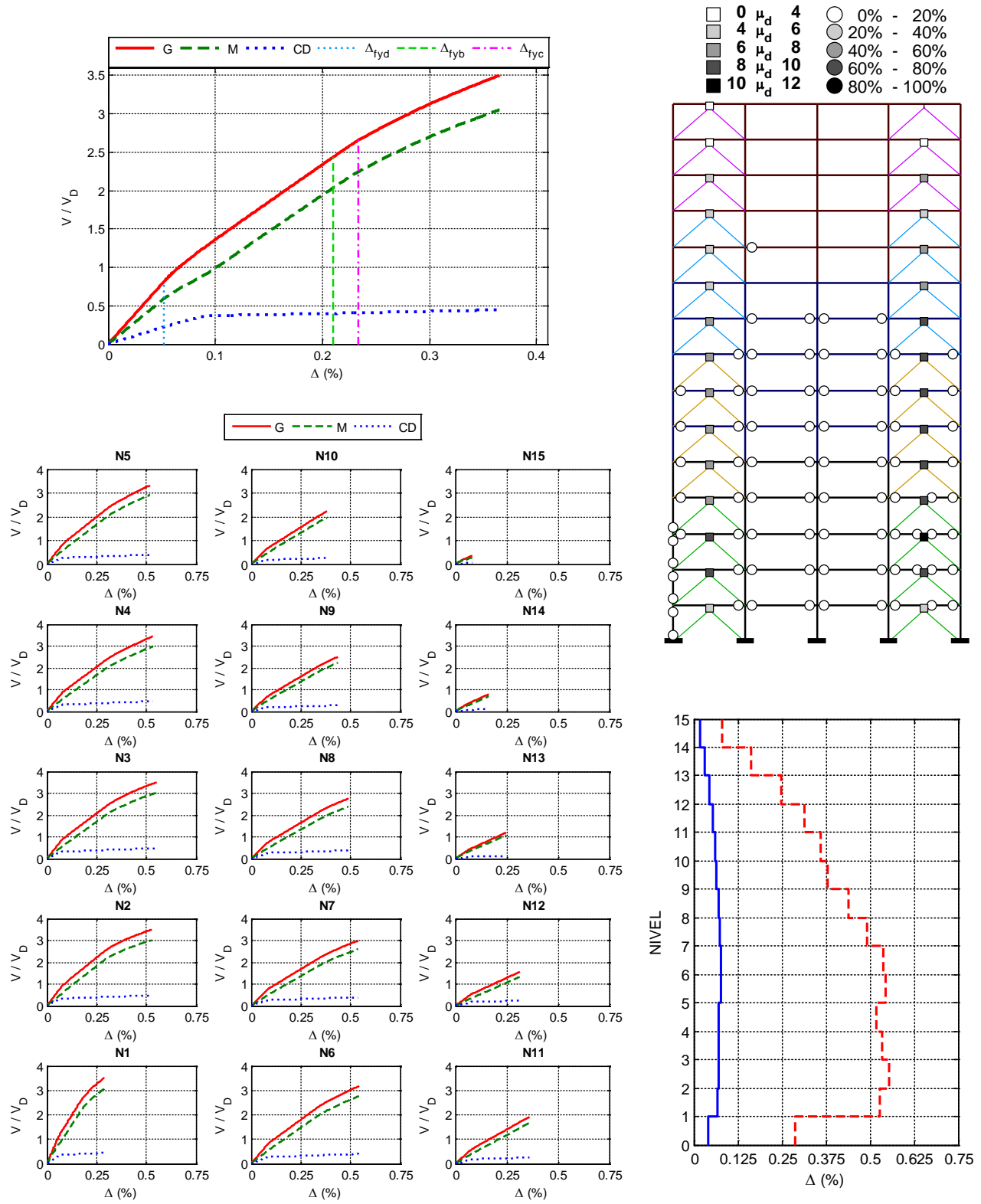


Figura A.125 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

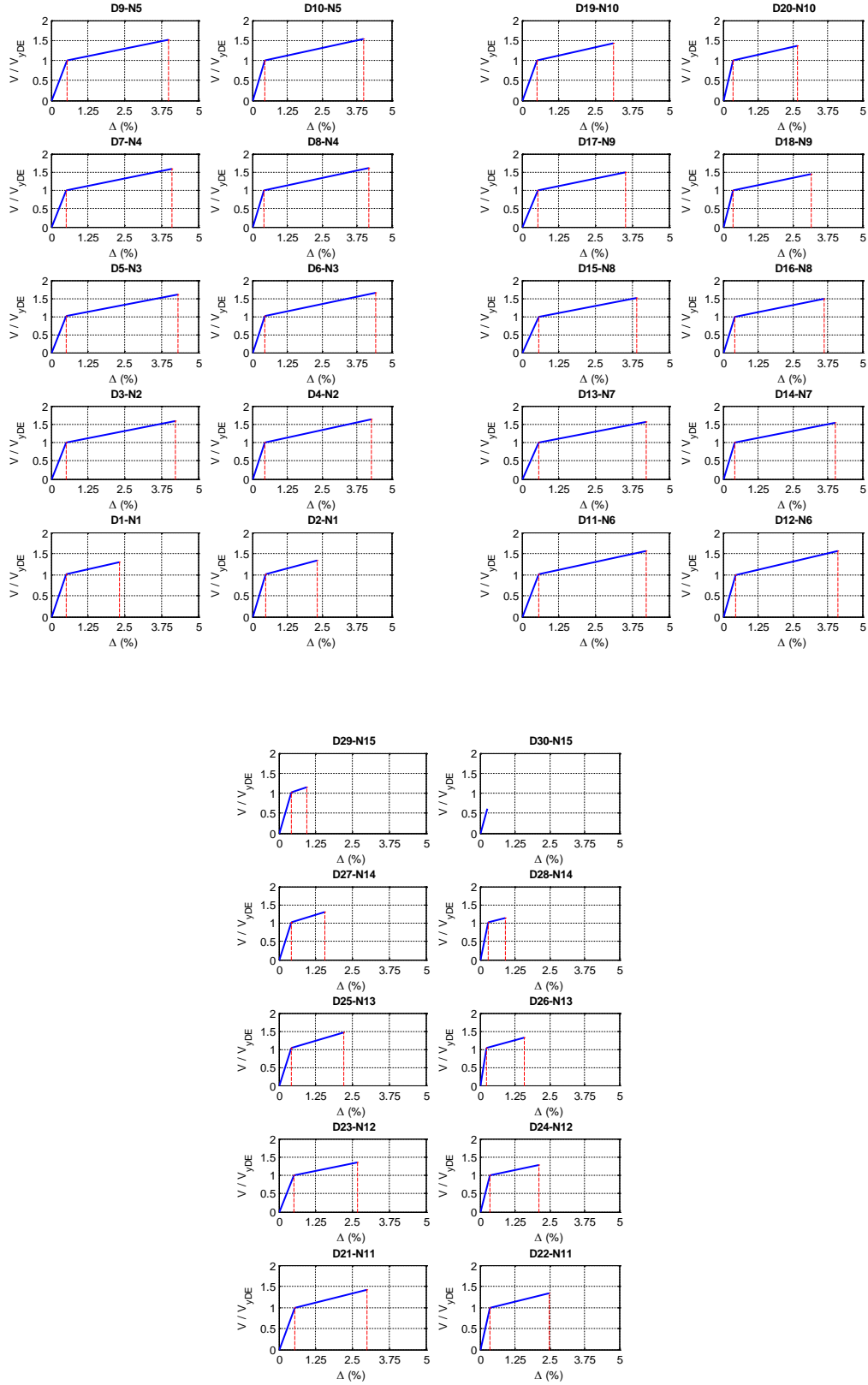


Figura A.126 $N = 15$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

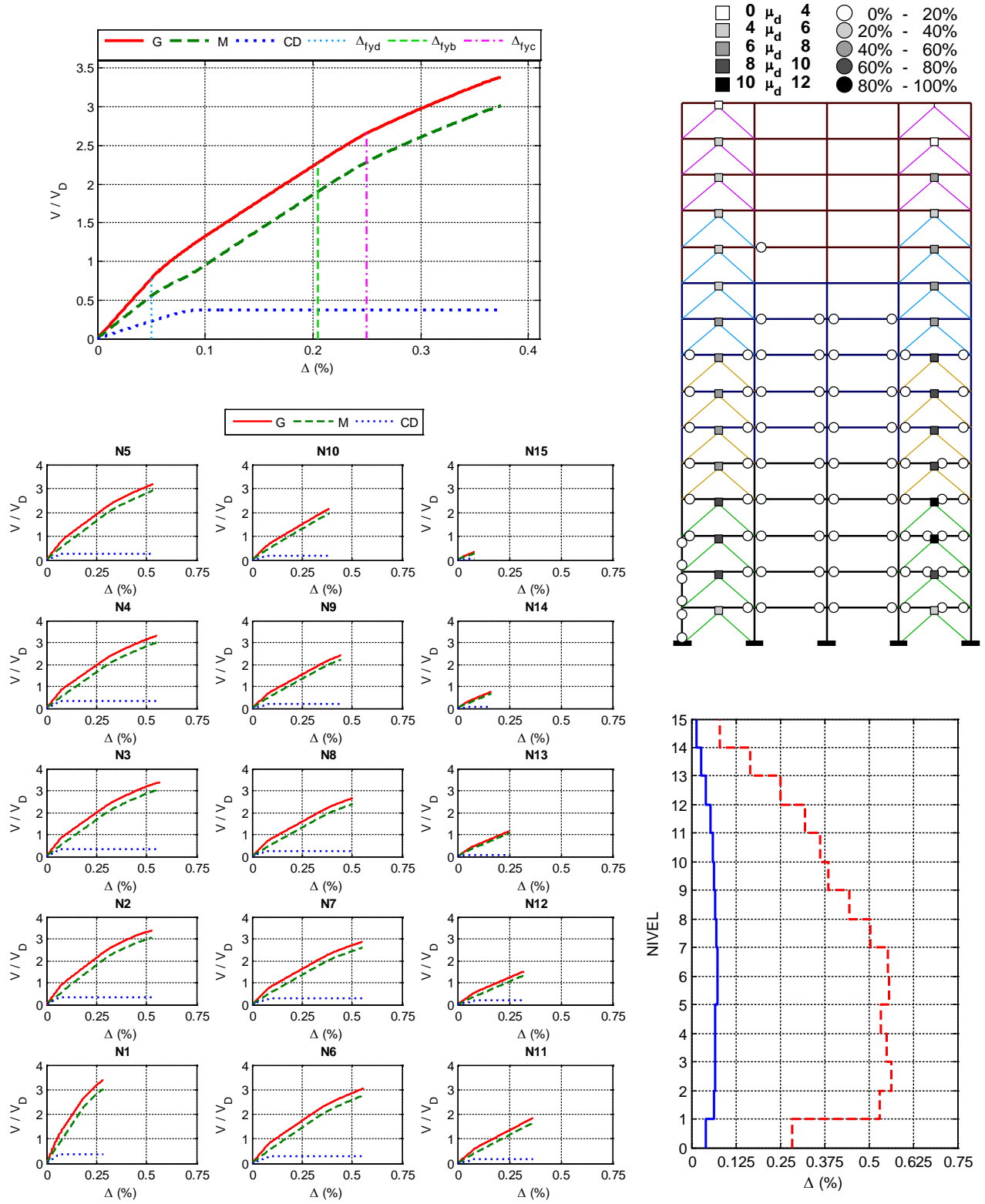


Figura A.127 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

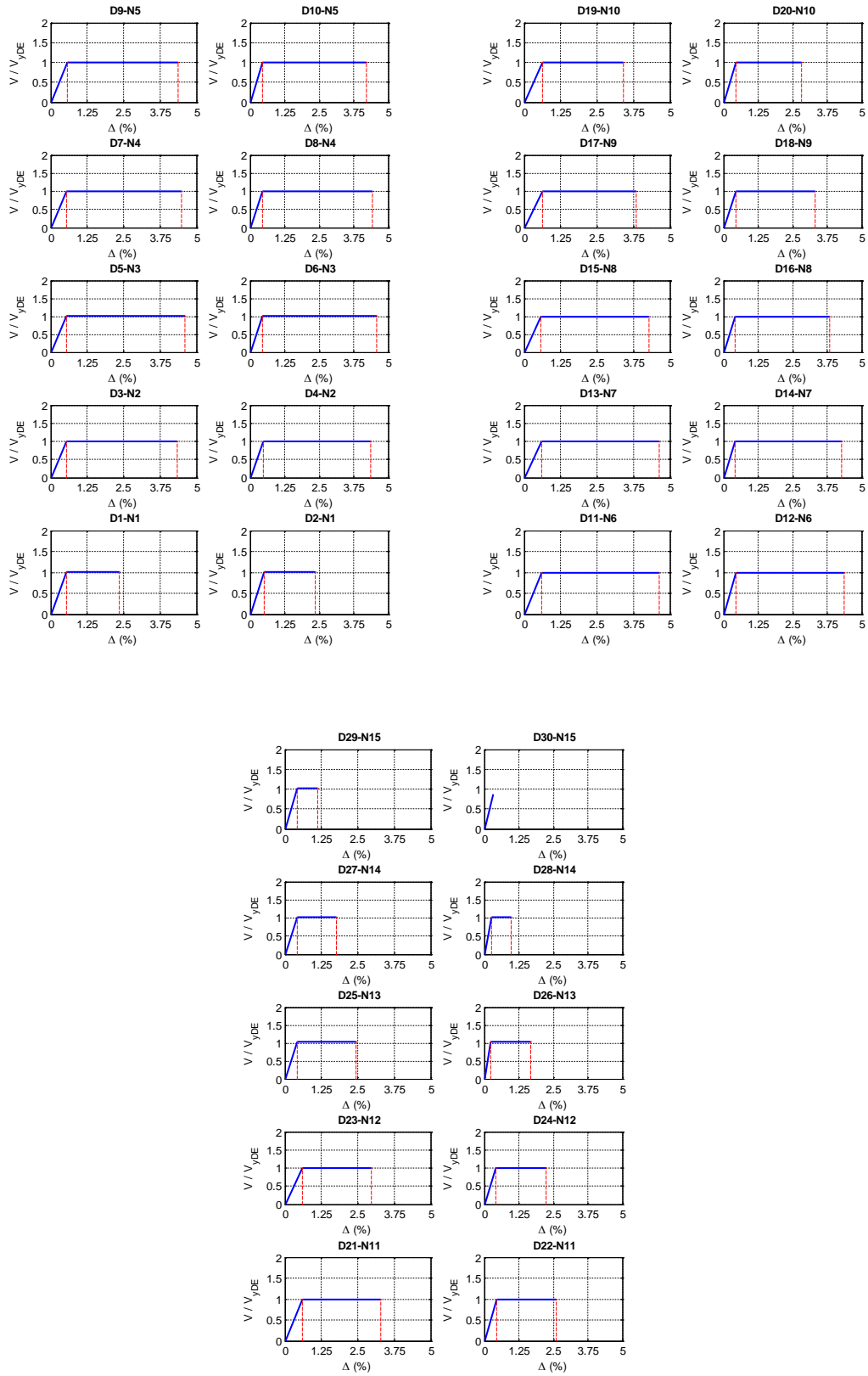


Figura A.128 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

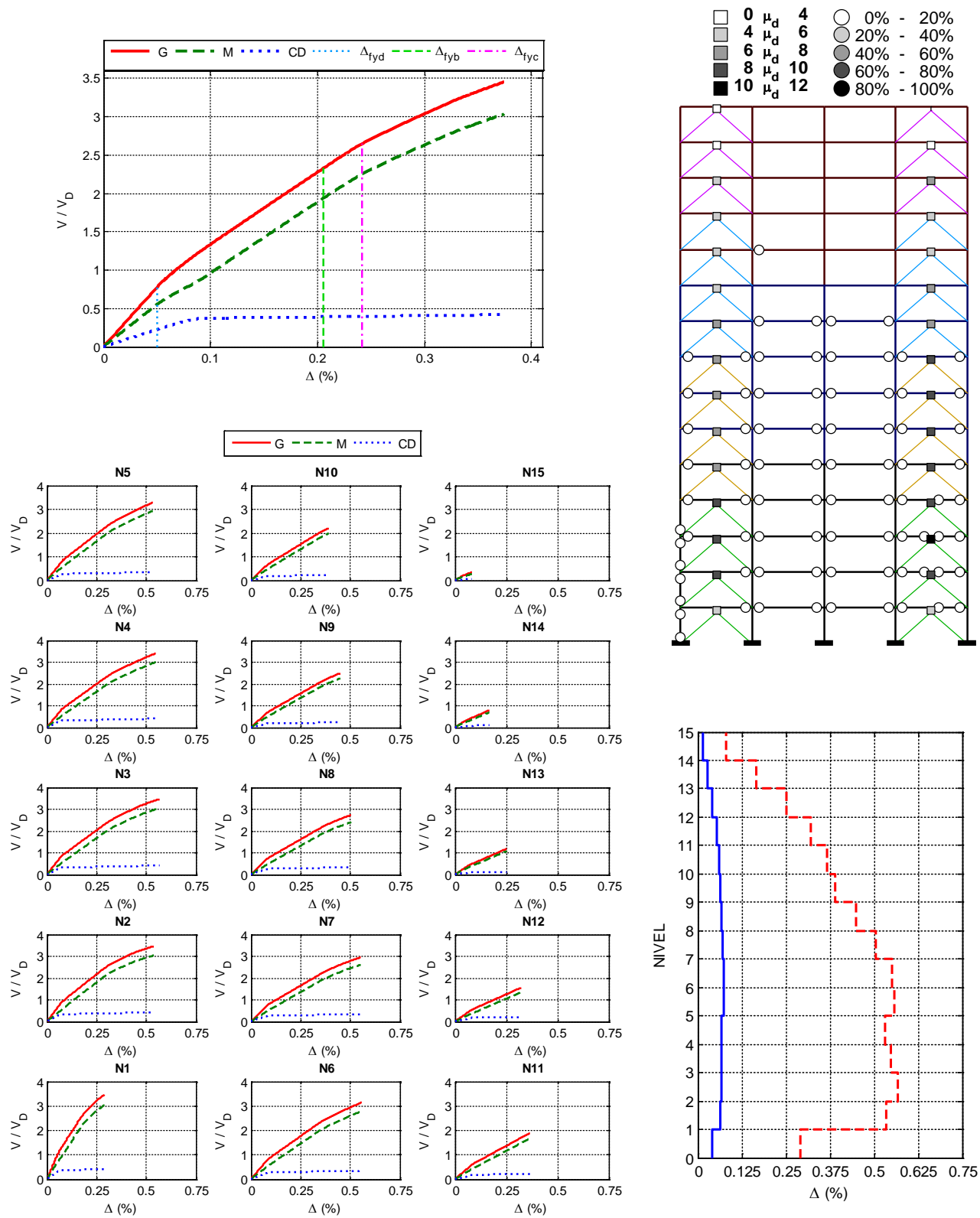


Figura A.129 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

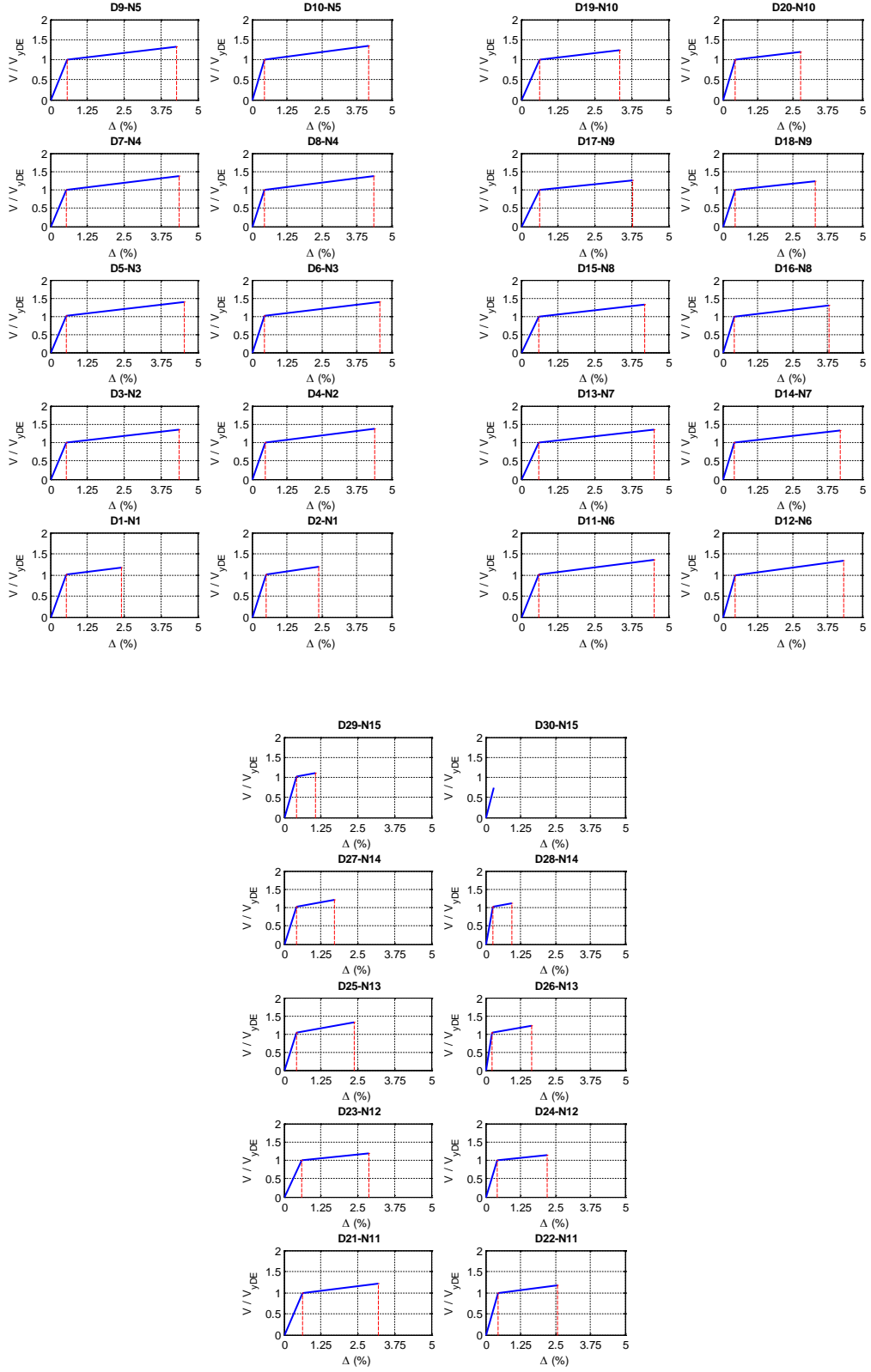


Figura A.130 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

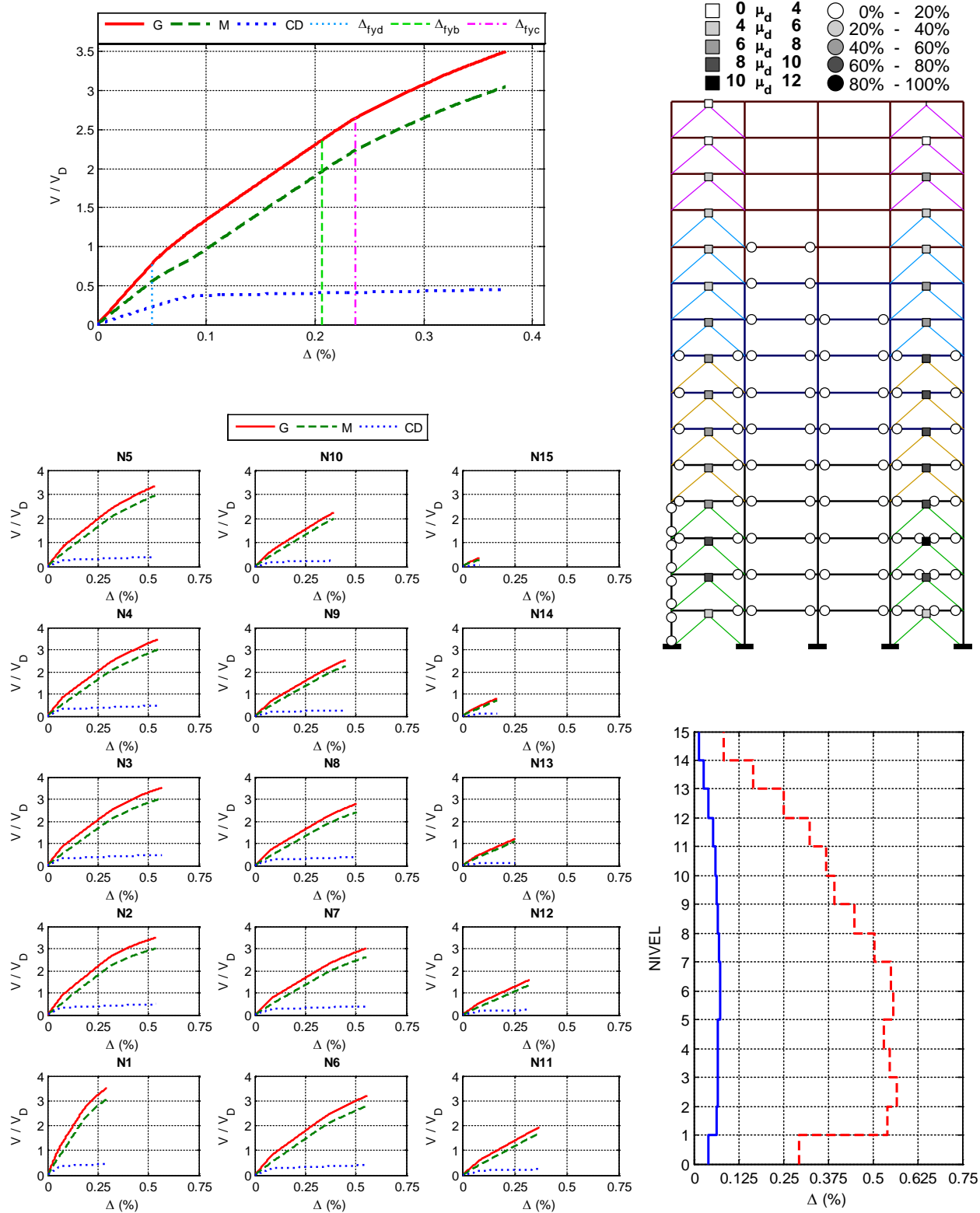


Figura A.131 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

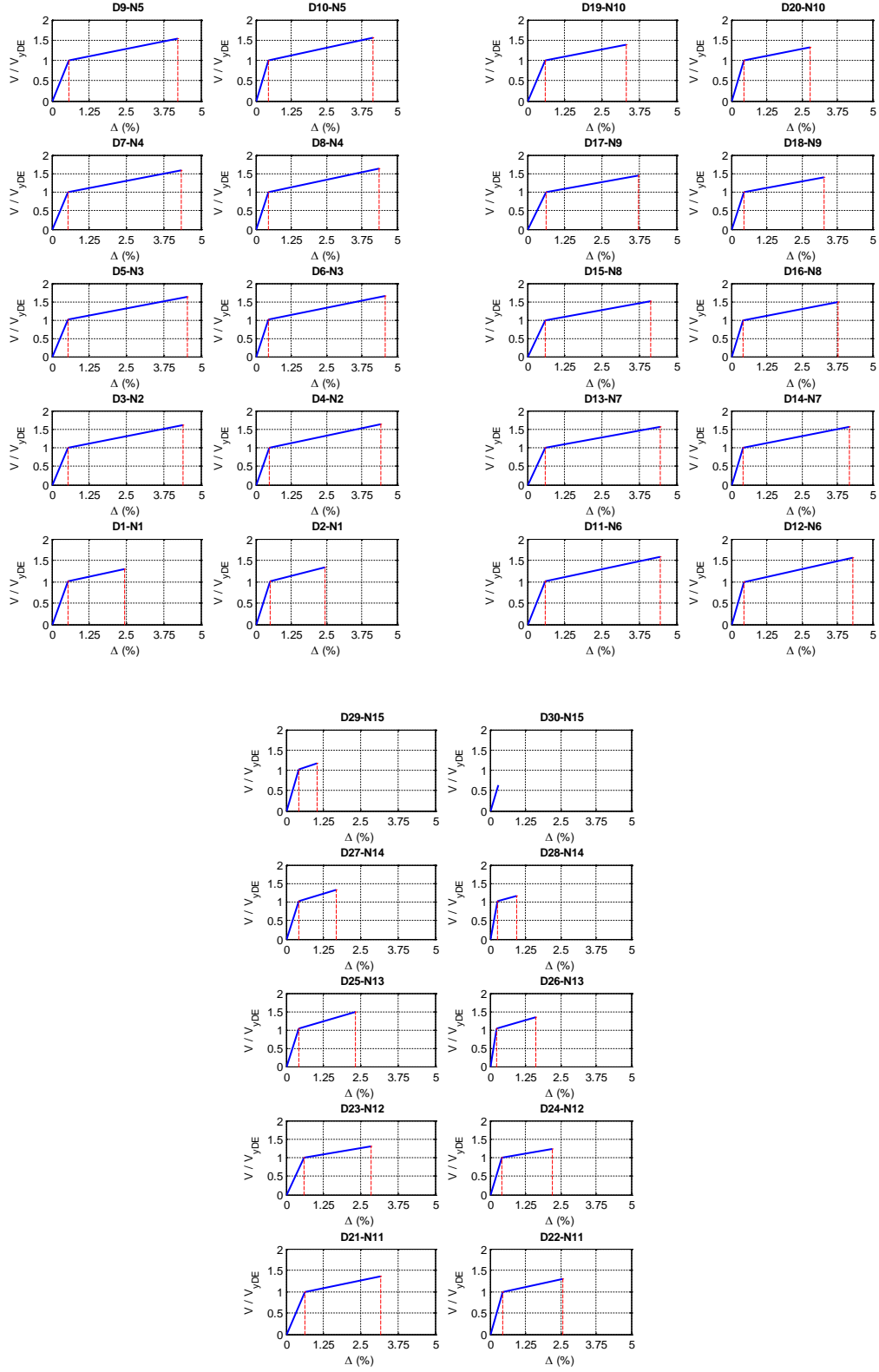


Figura A.132 $N = 15, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

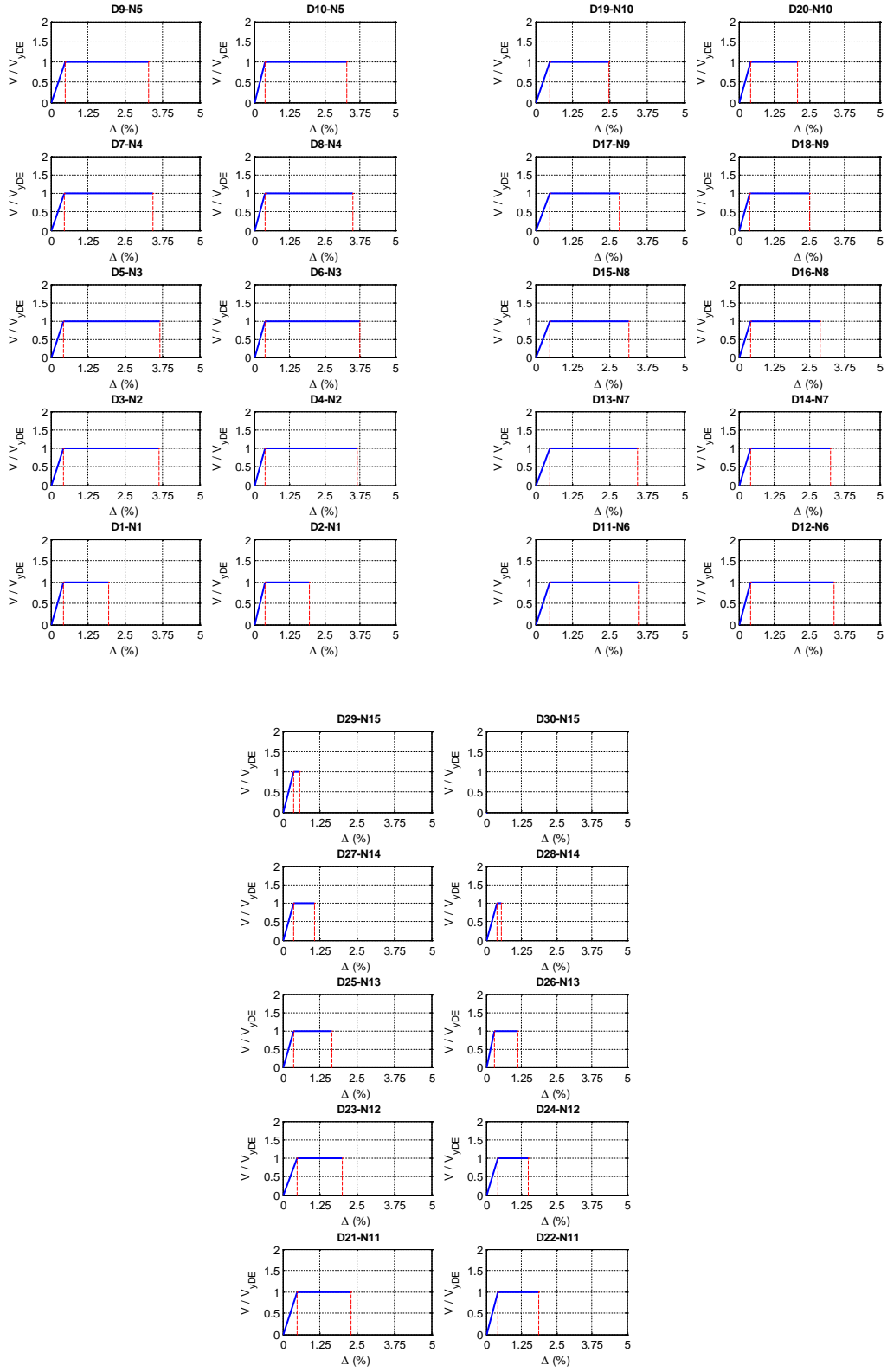


Figura A.134 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

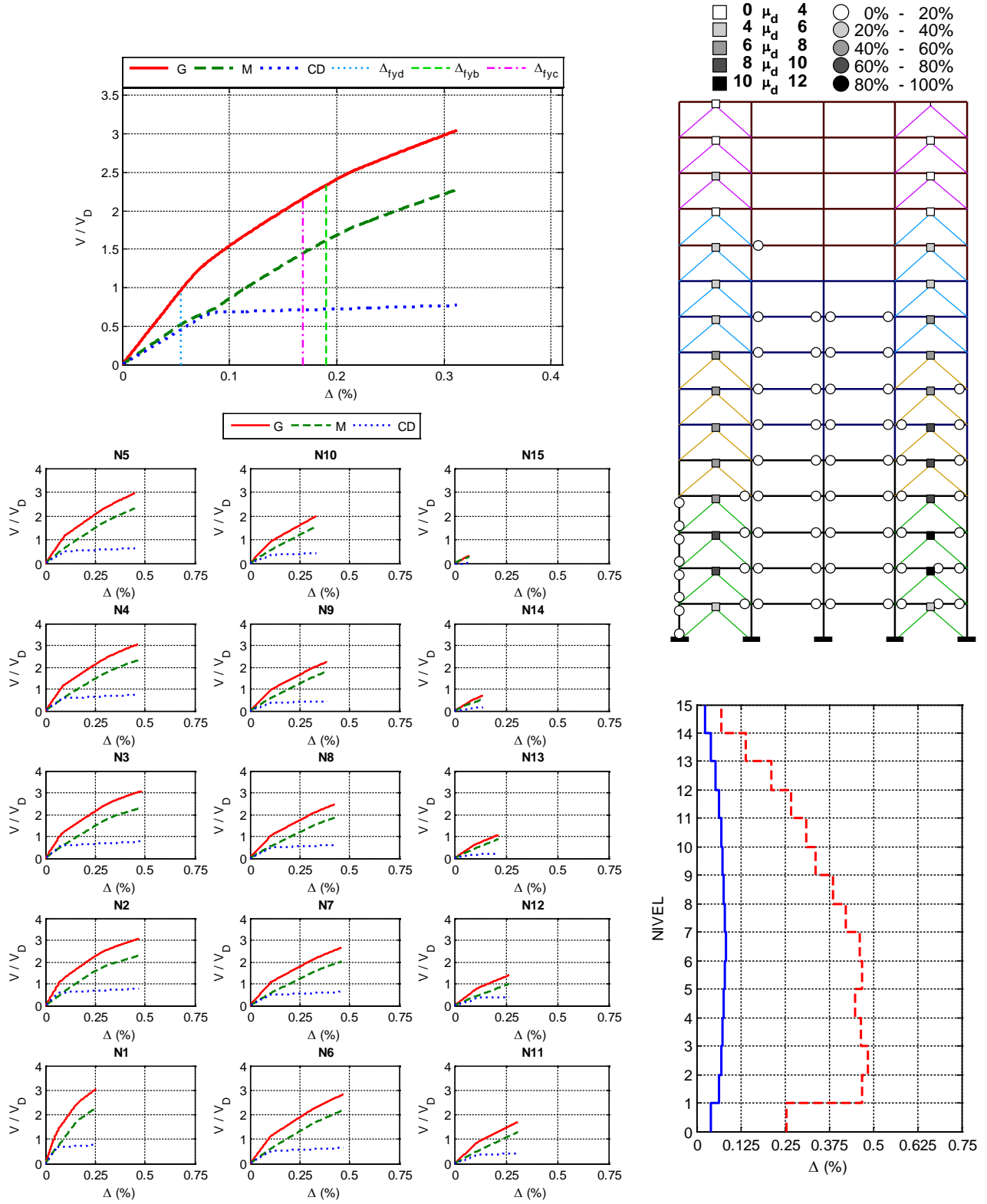


Figura A.135 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

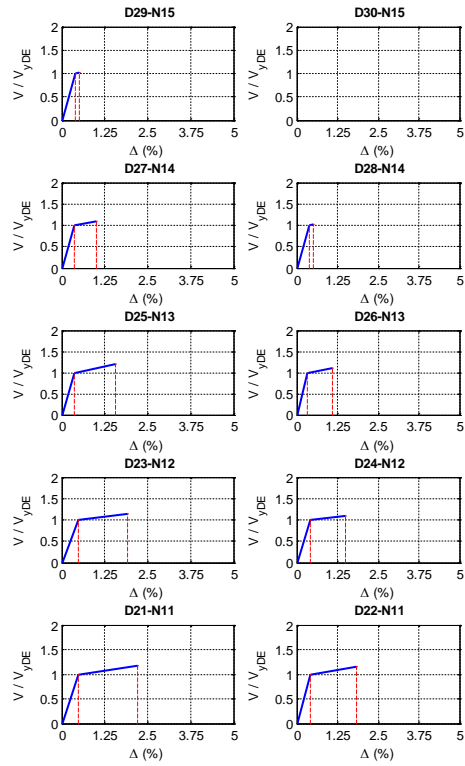
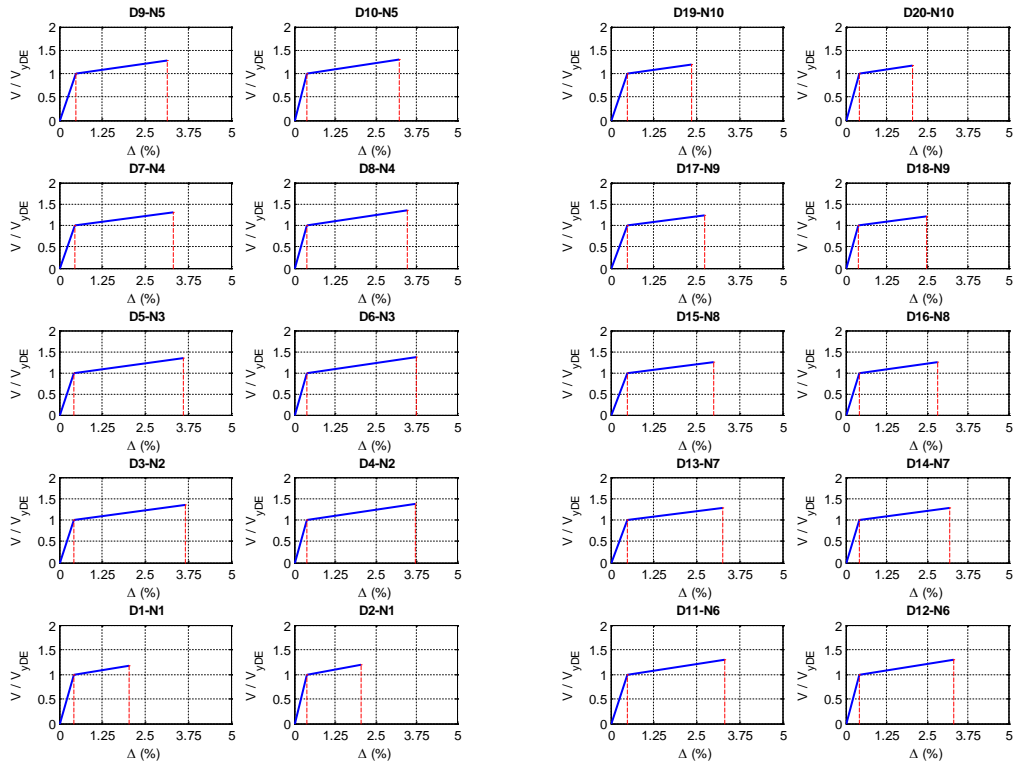


Figura A.136 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

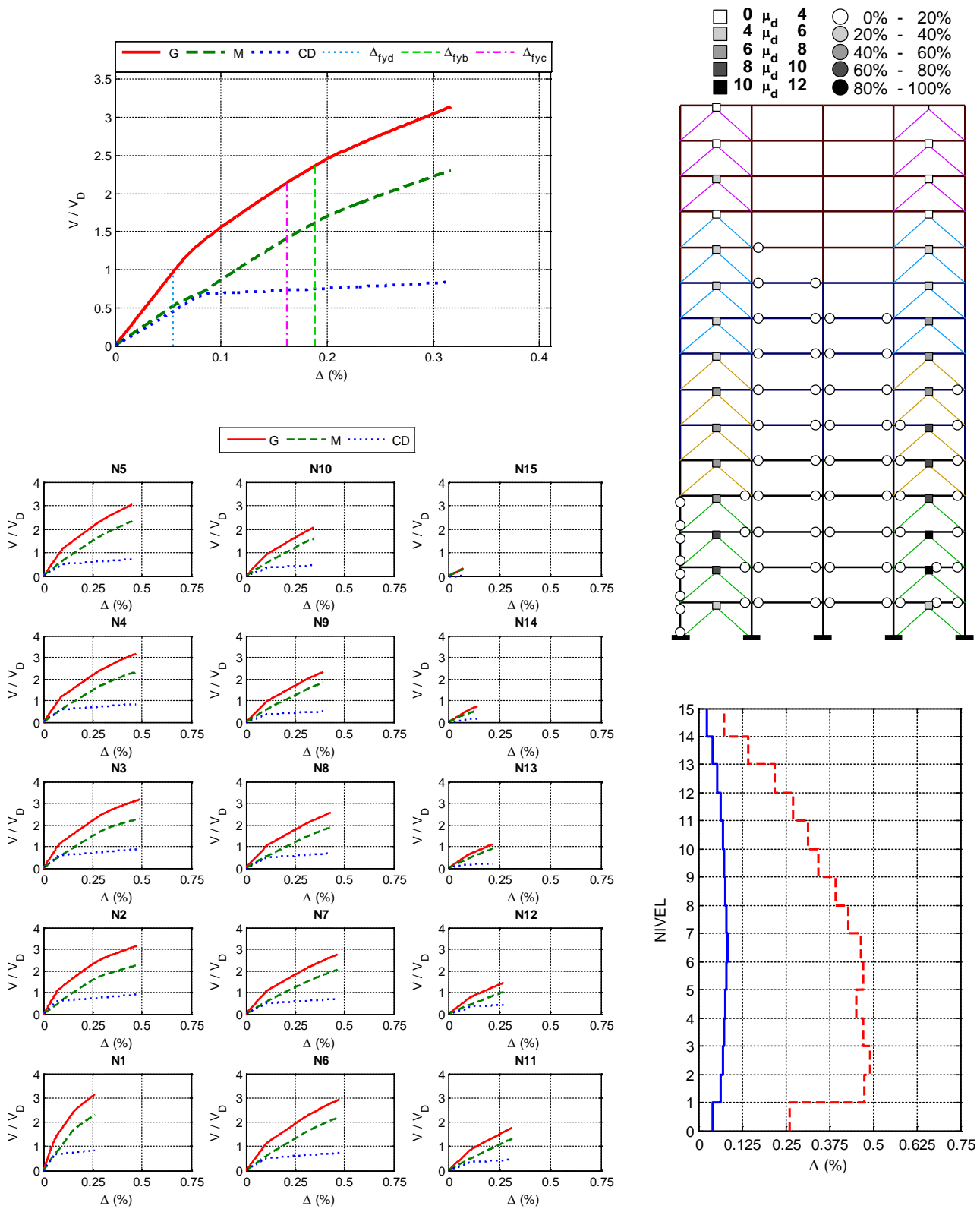


Figura A.137 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

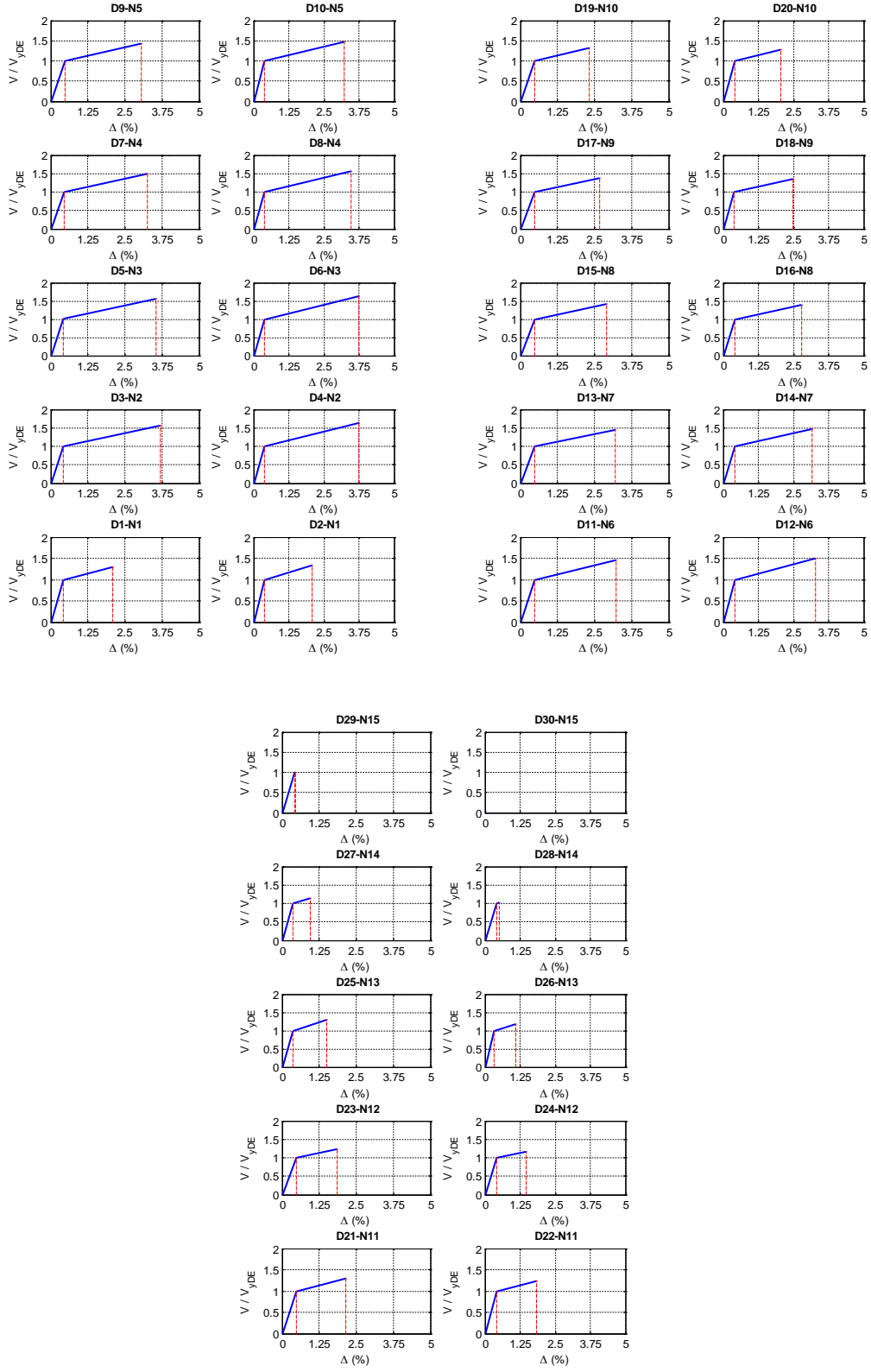


Figura A.138 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

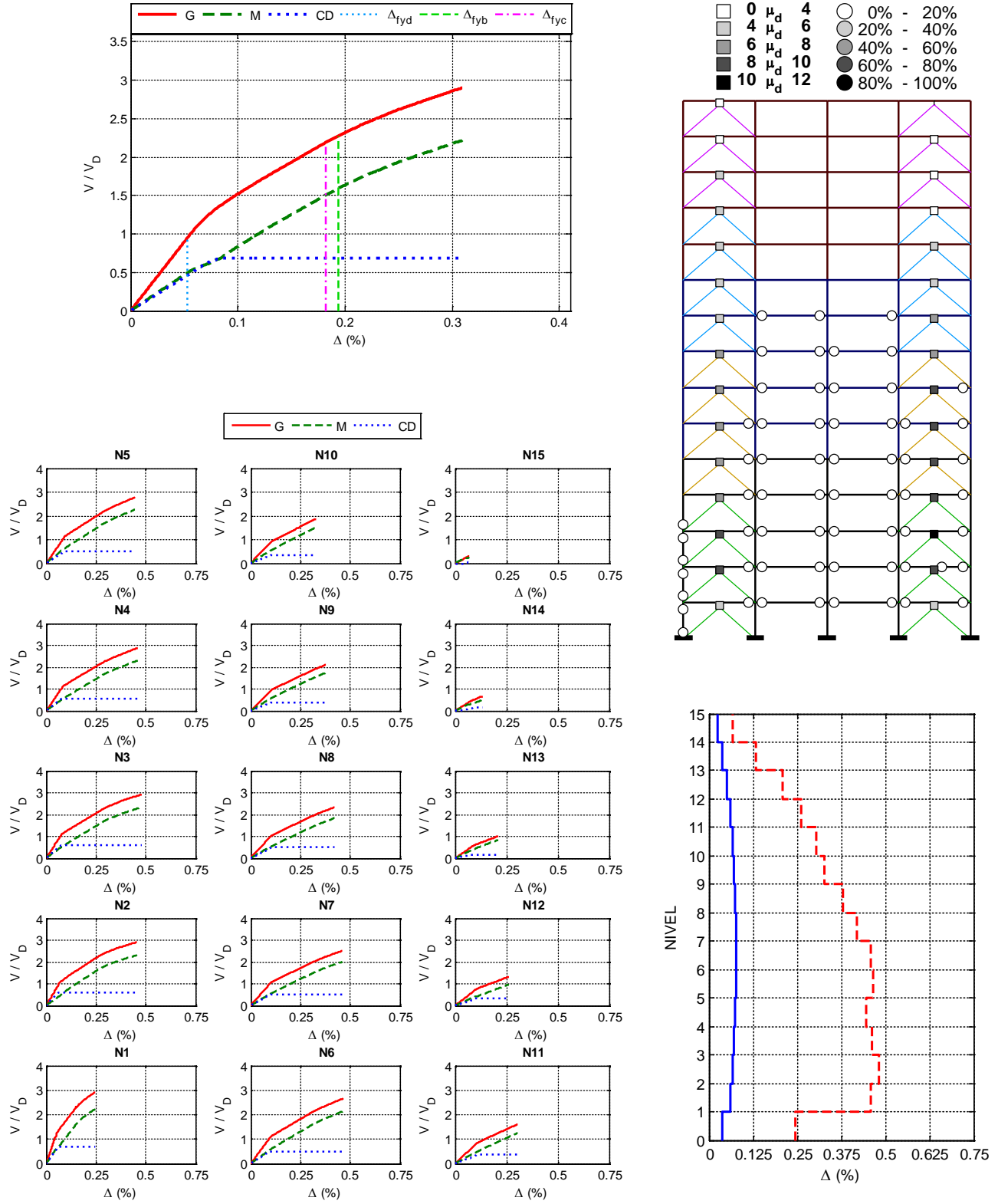


Figura A.139 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

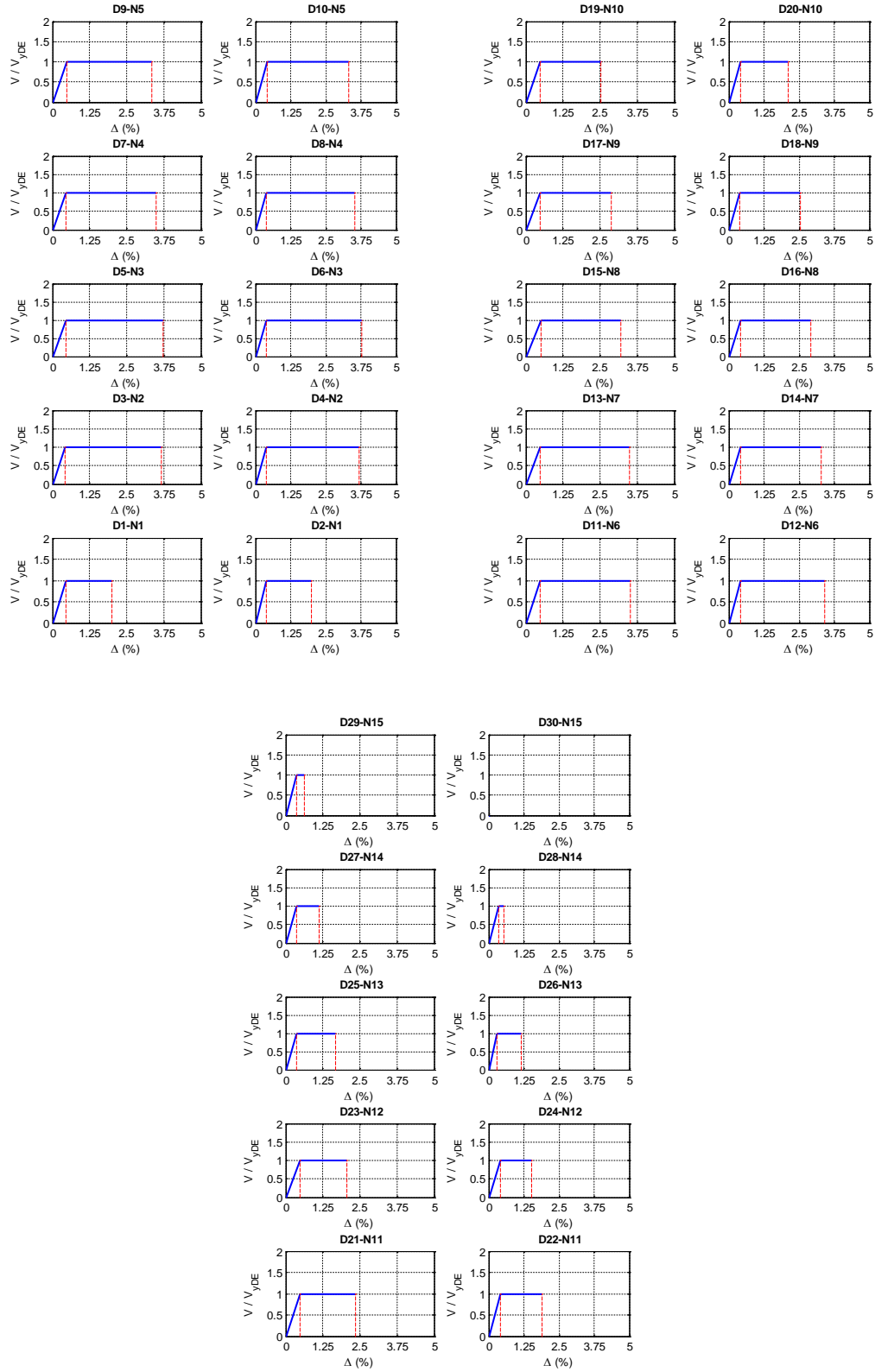


Figura A.140 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

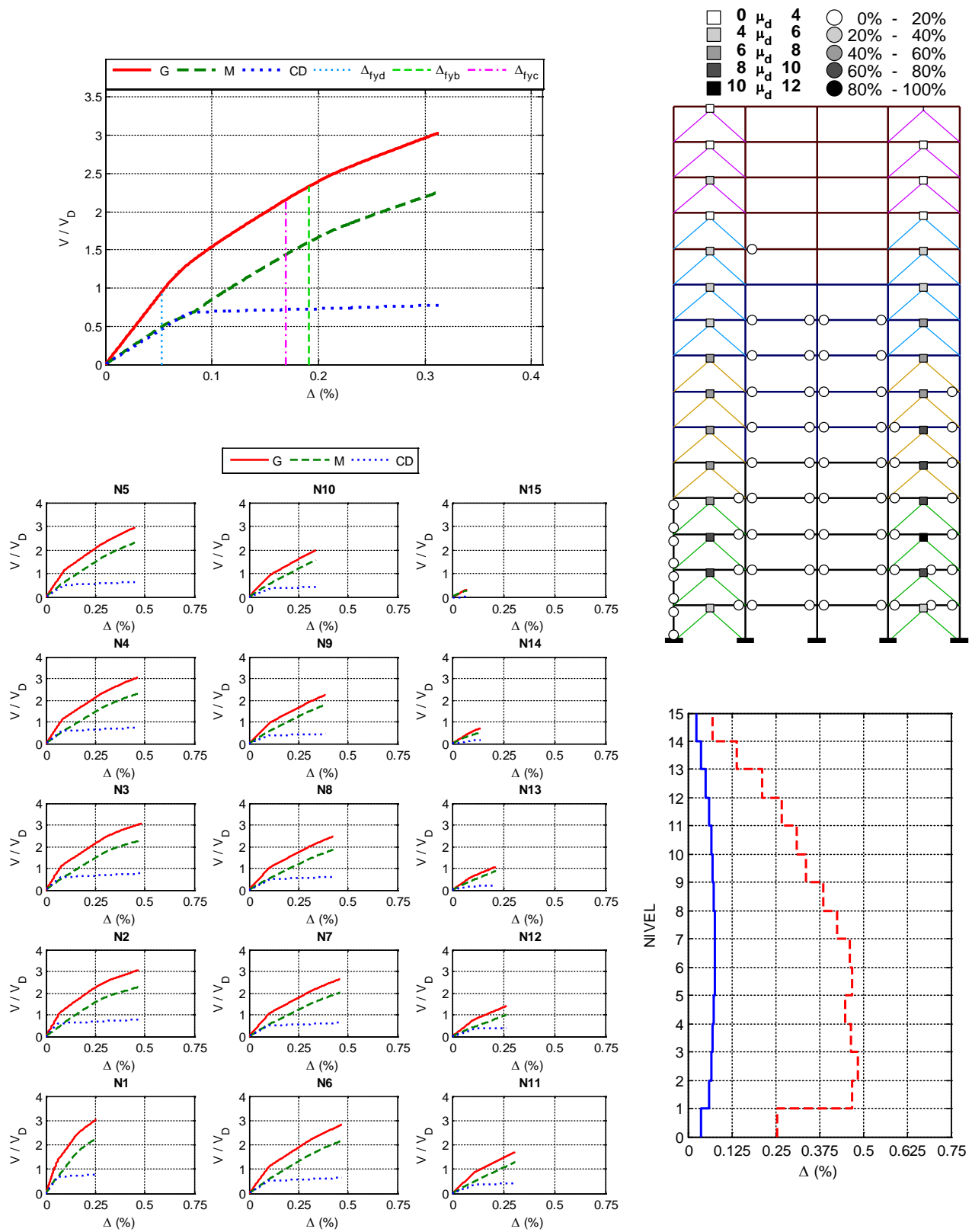


Figura A.141 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

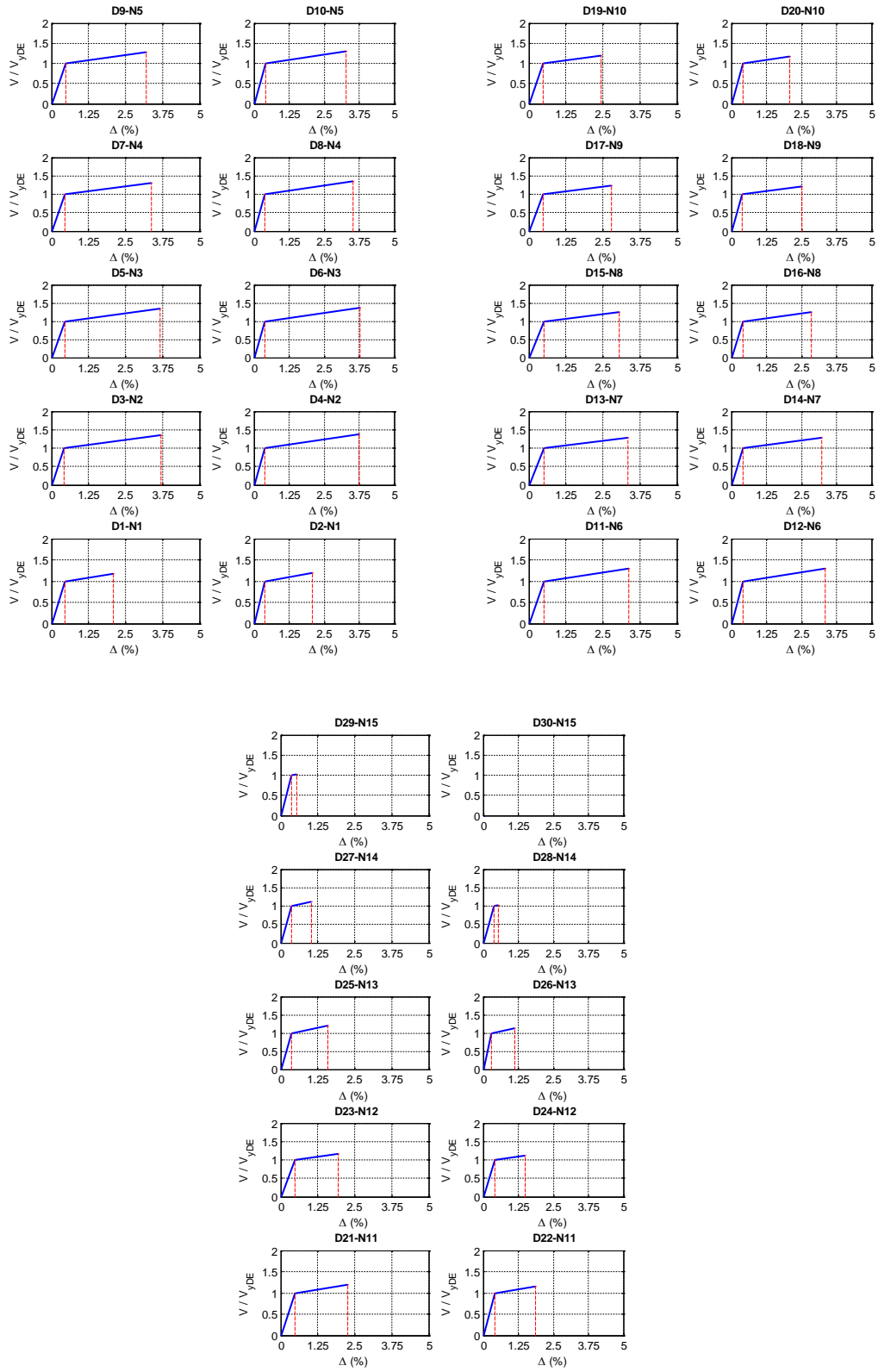


Figura A.142 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

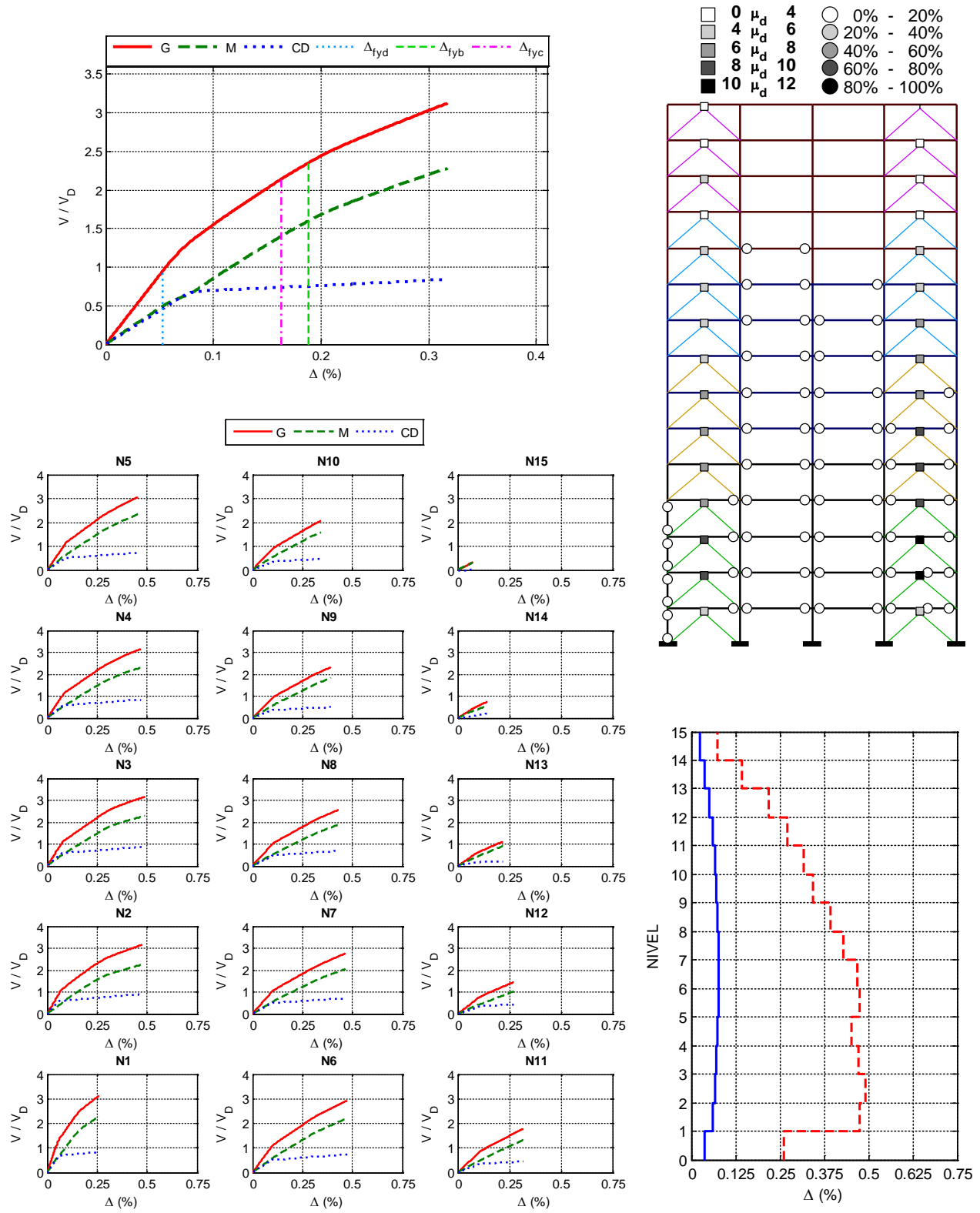


Figura A.143 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

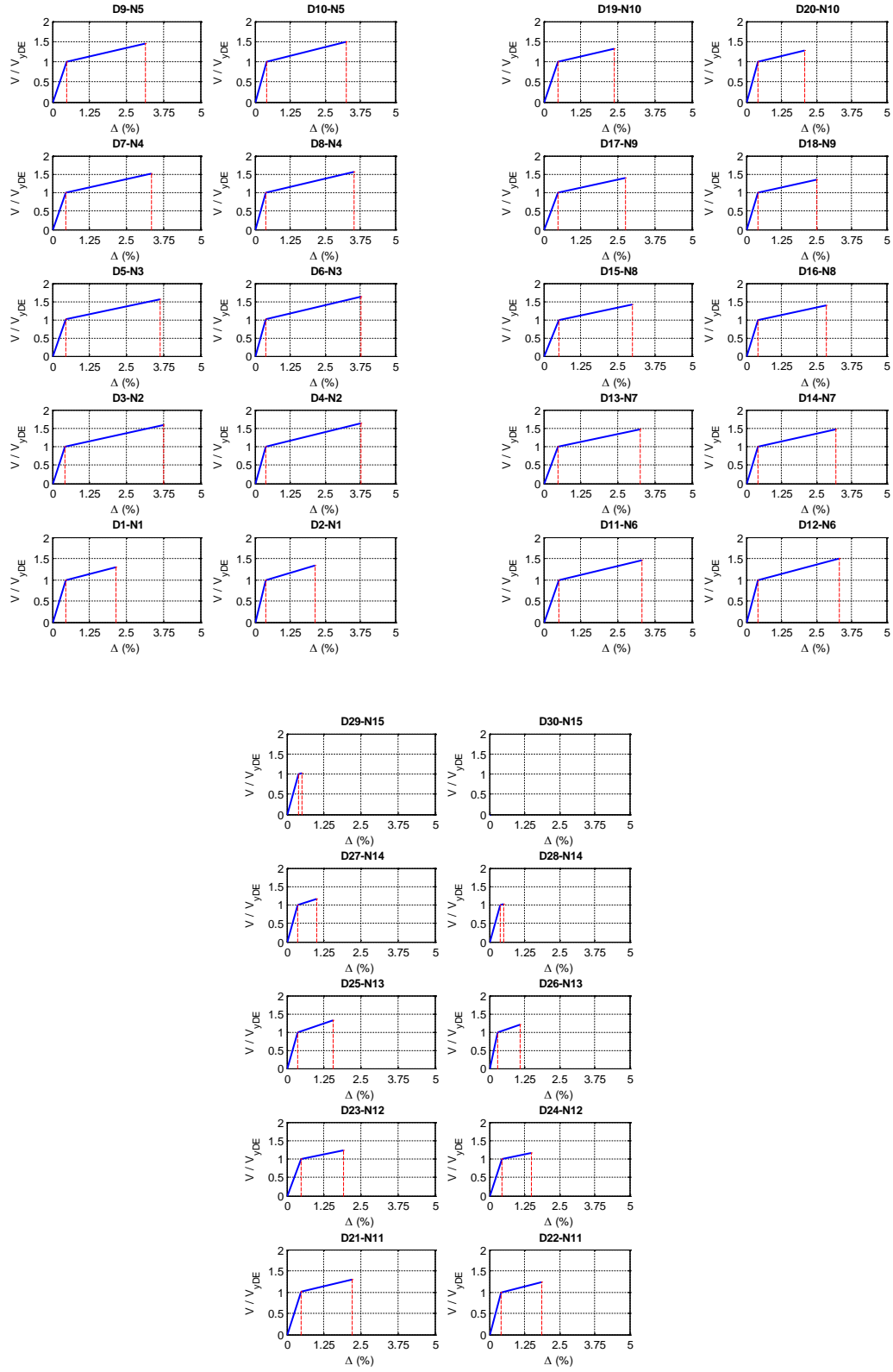


Figura A.144 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

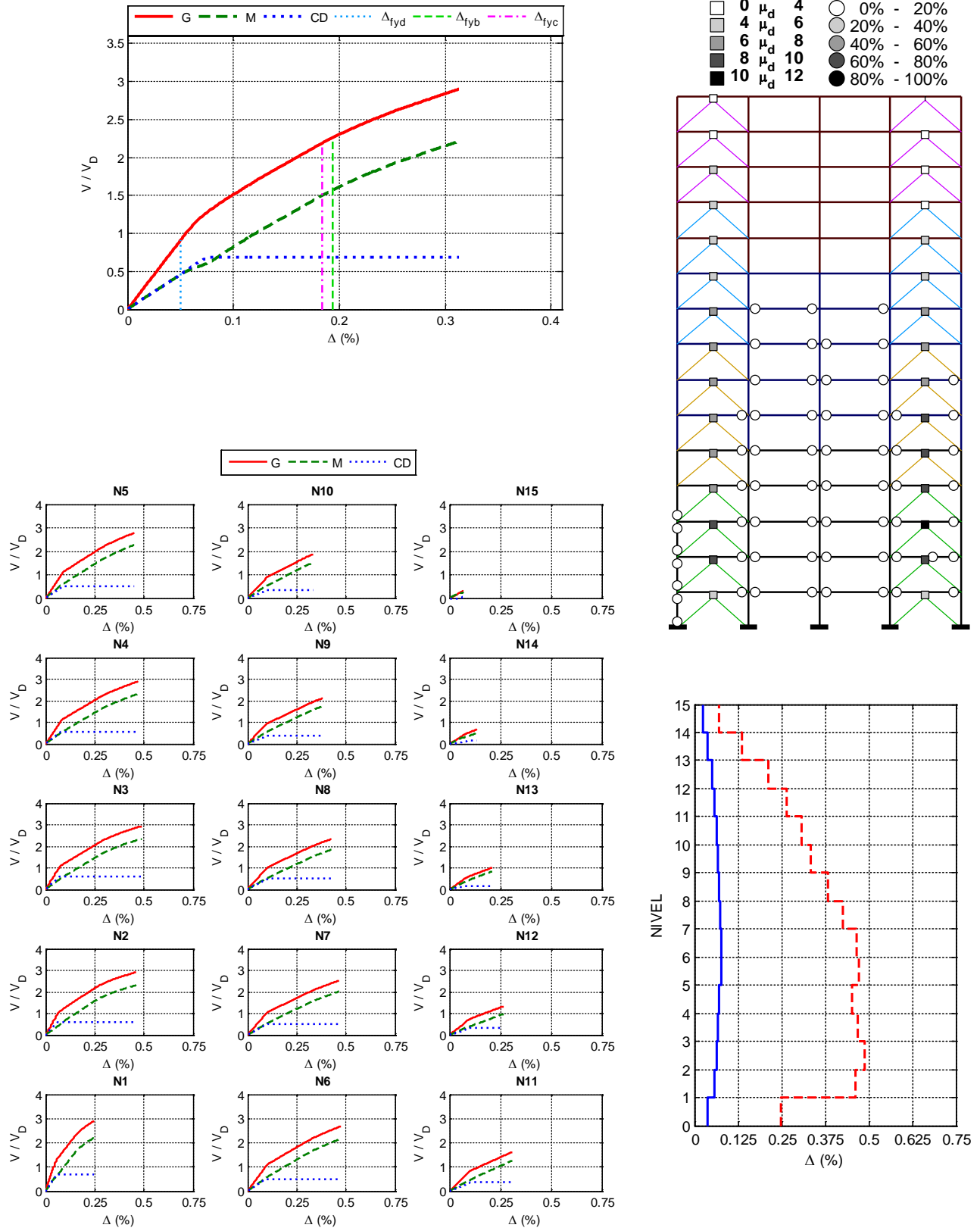


Figura A.145 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

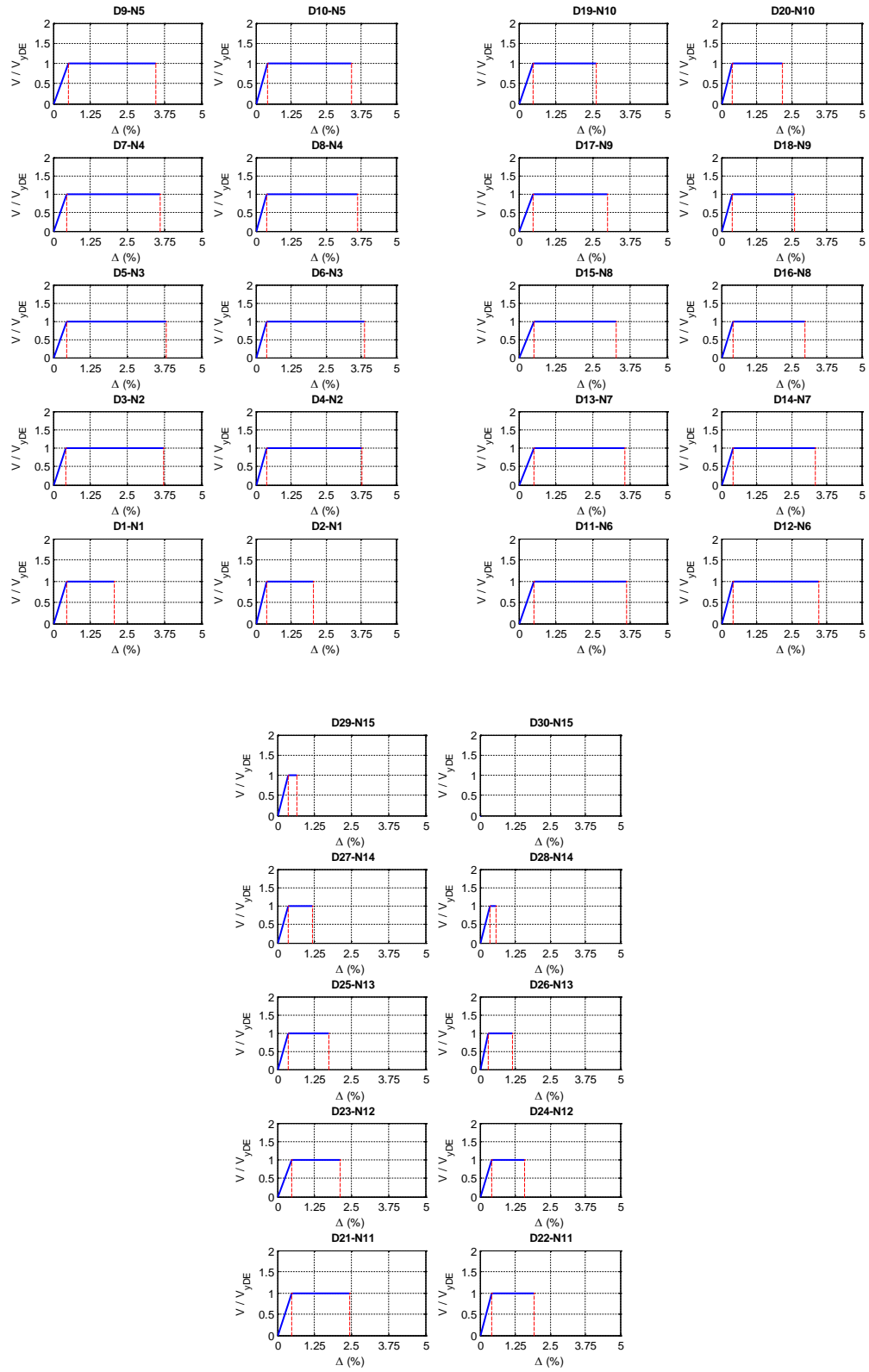


Figura A.146 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

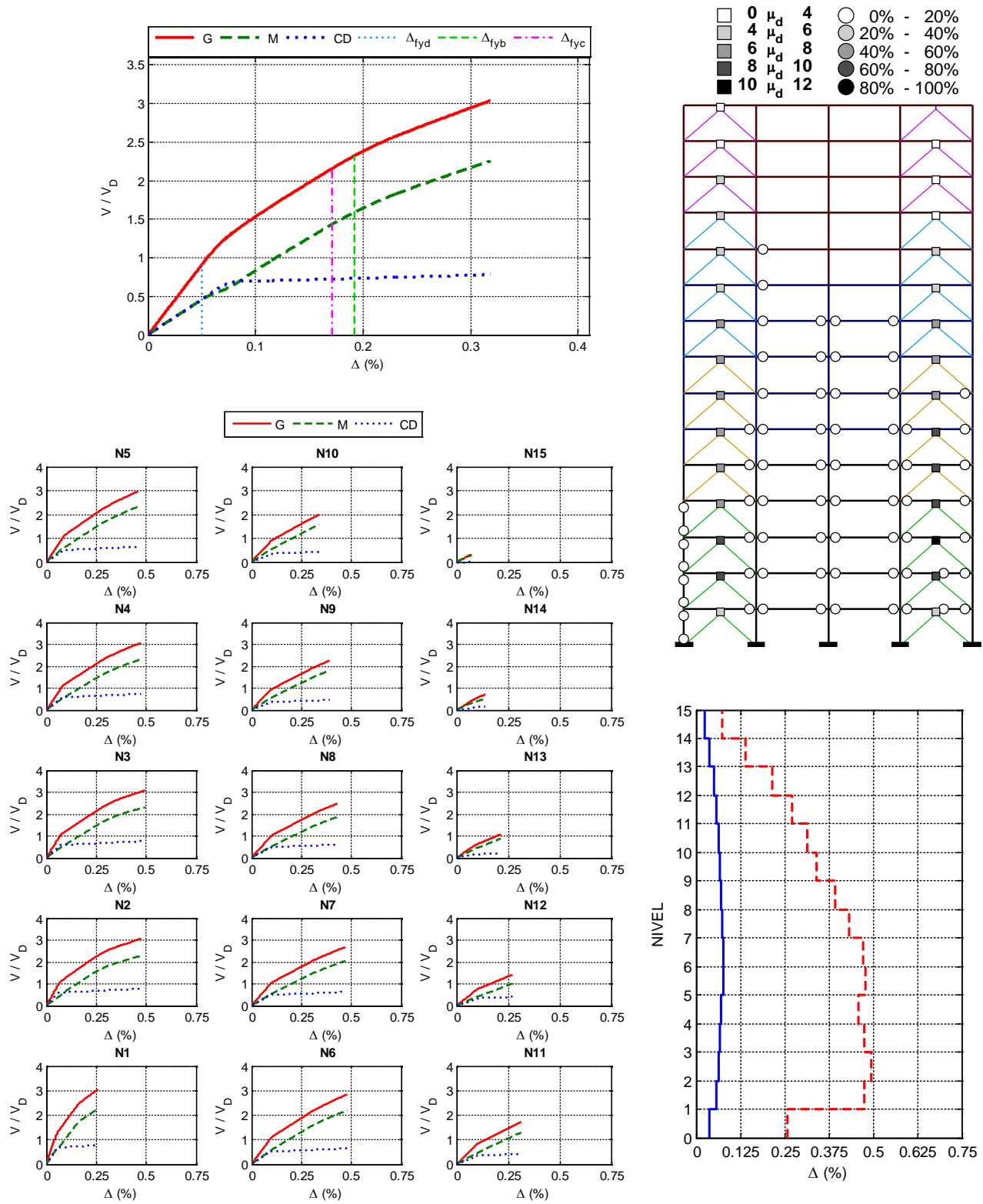


Figura A.147 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

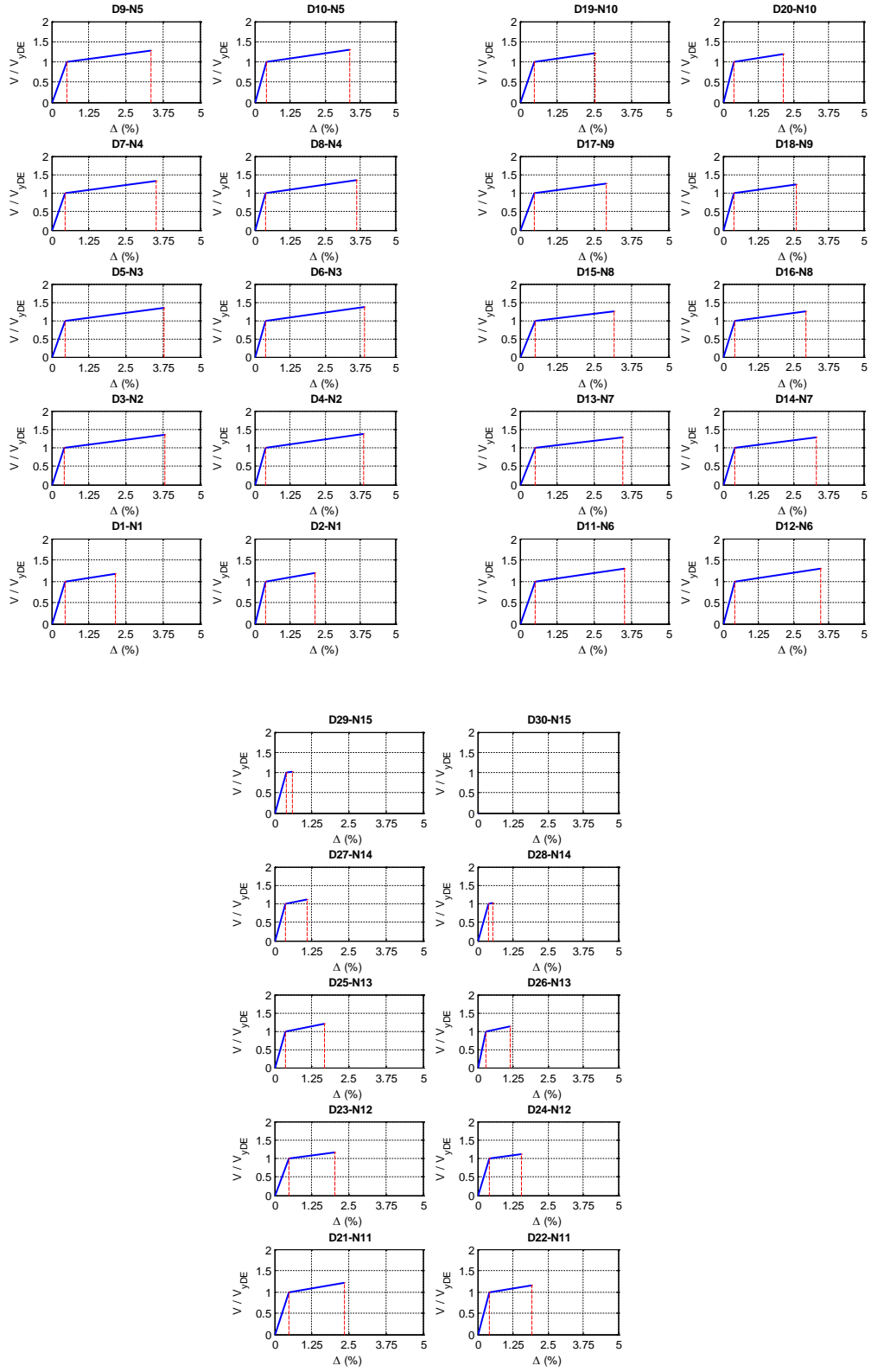


Figura A.148 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

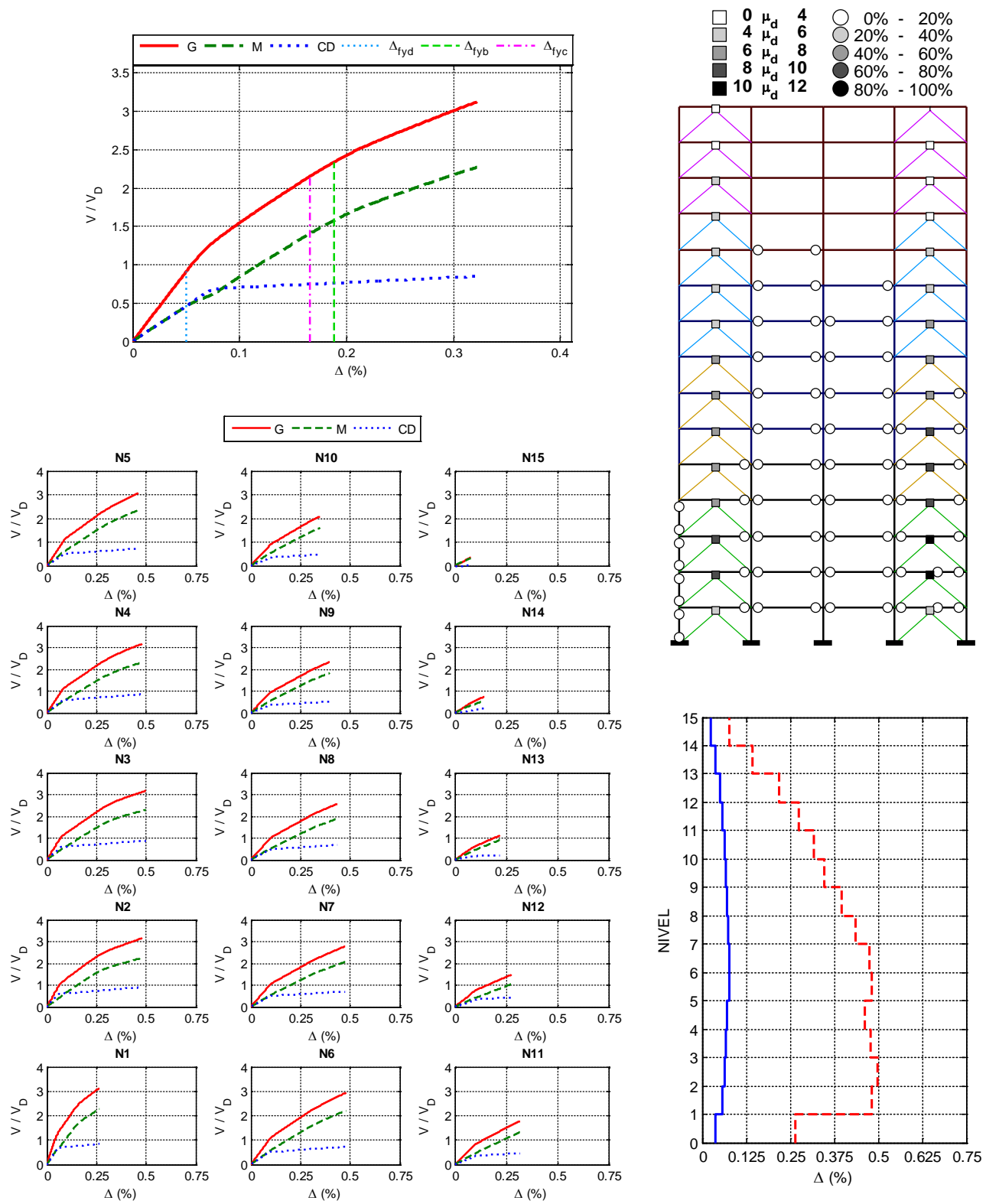


Figura A.149 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

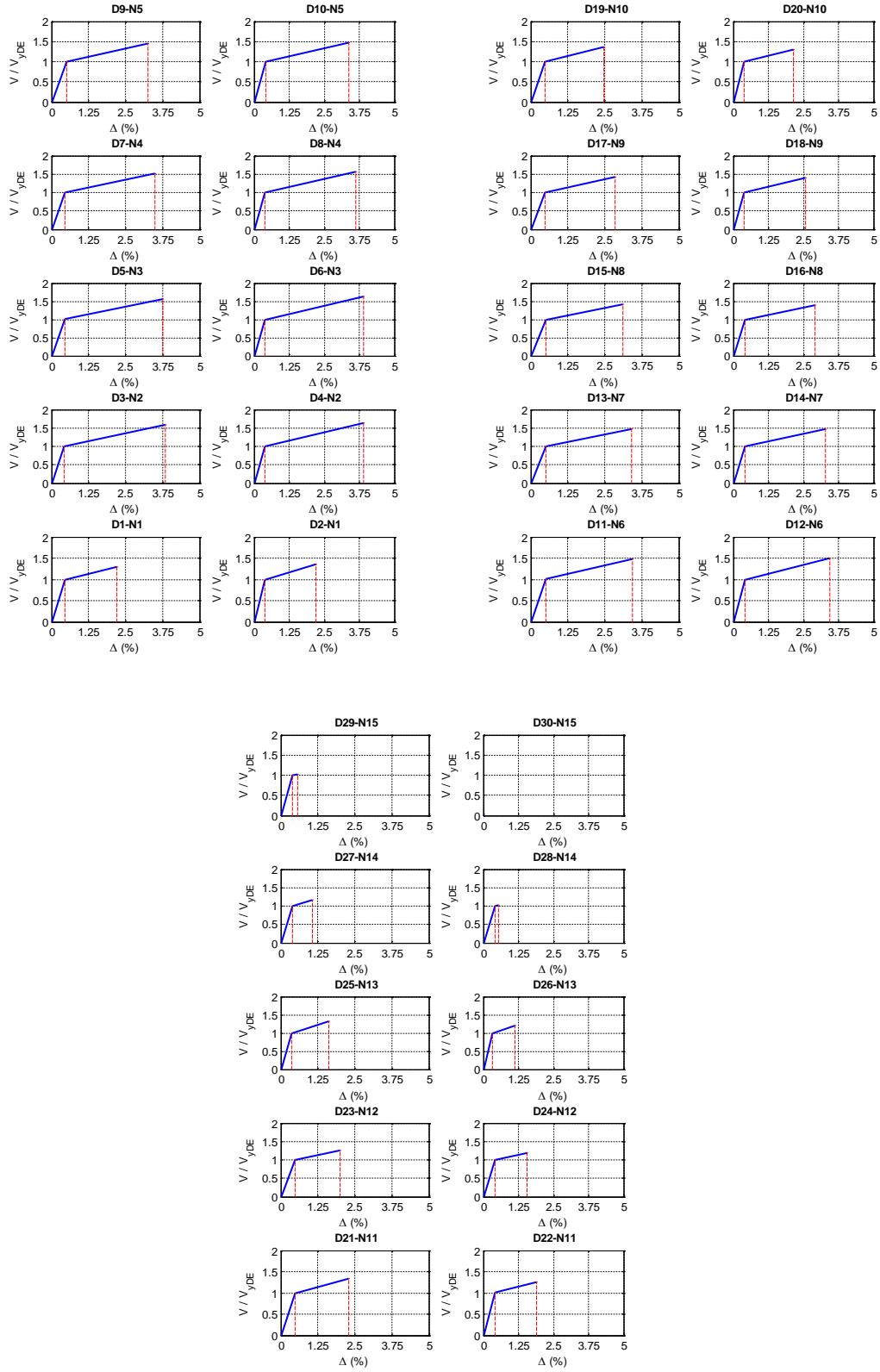


Figura A.150 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

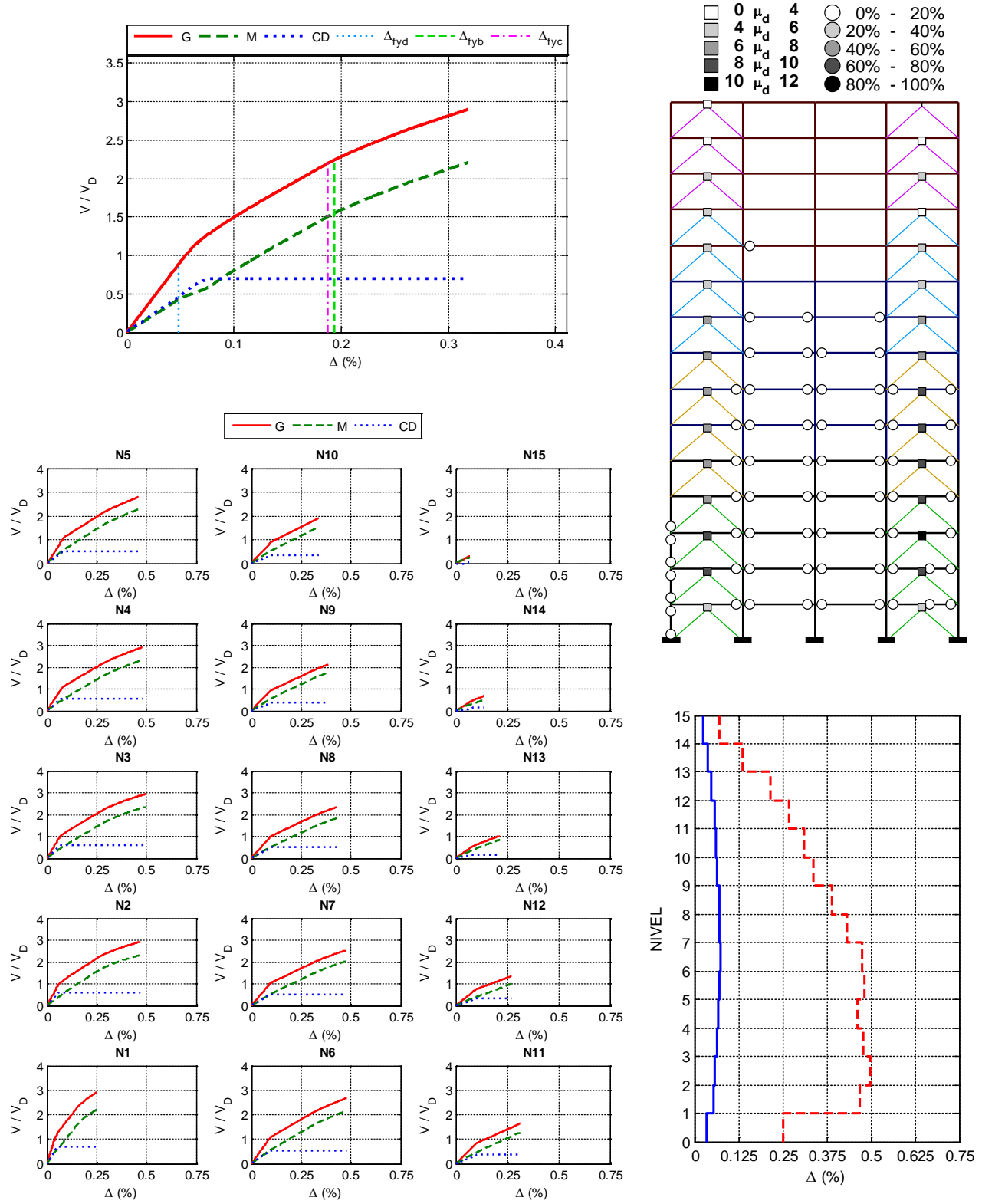


Figura A.151 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

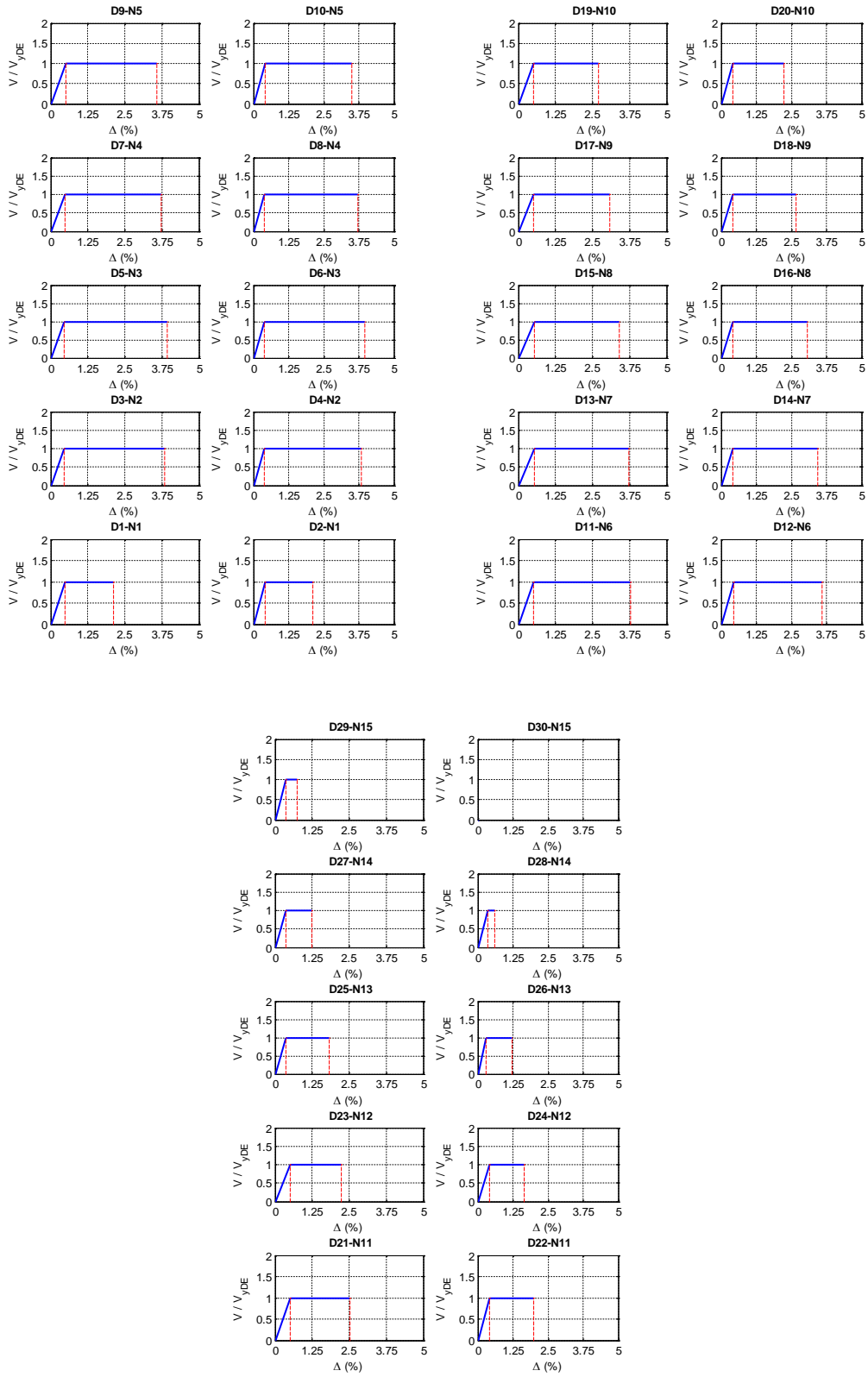


Figura A.152 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

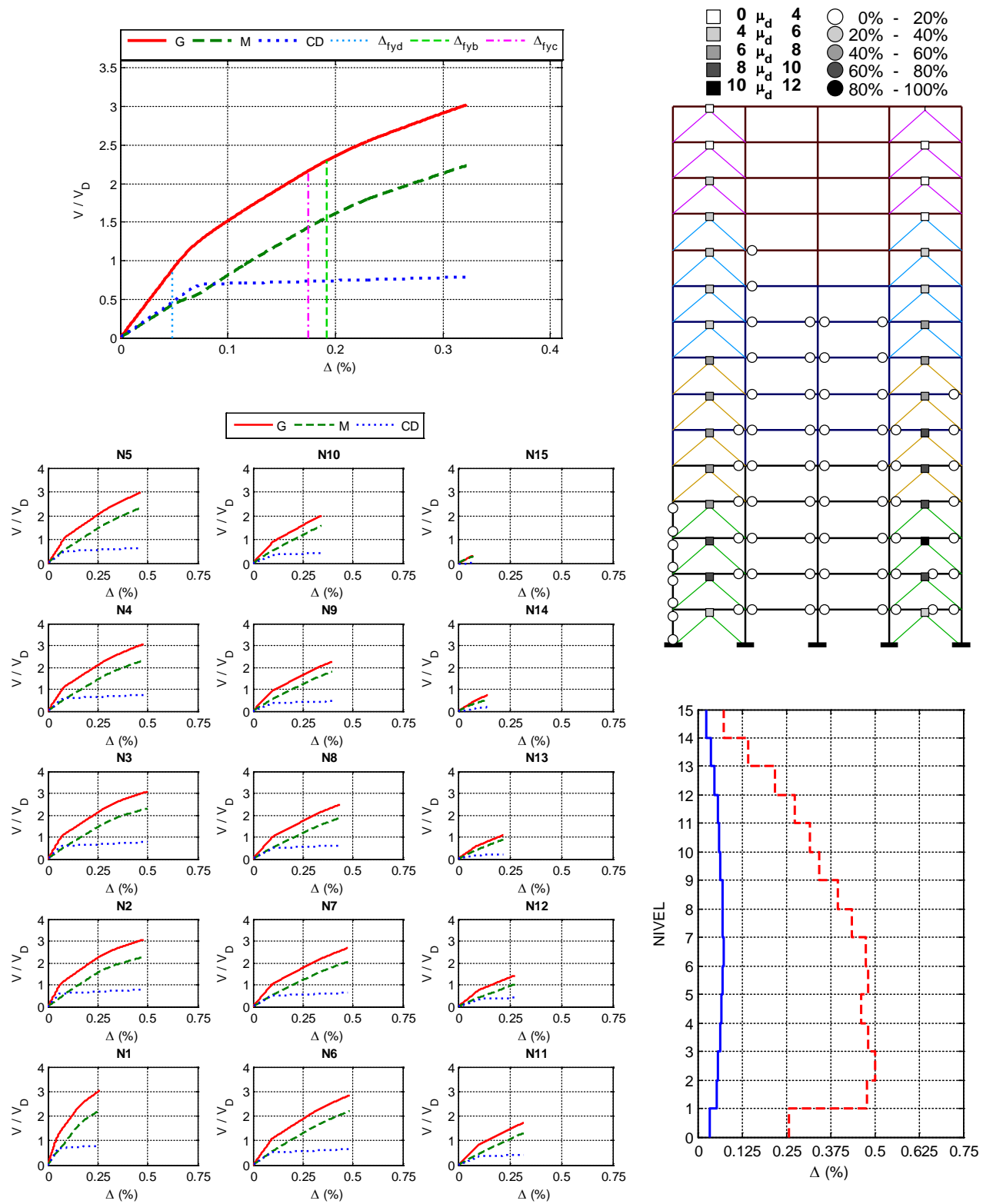


Figura A.153 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

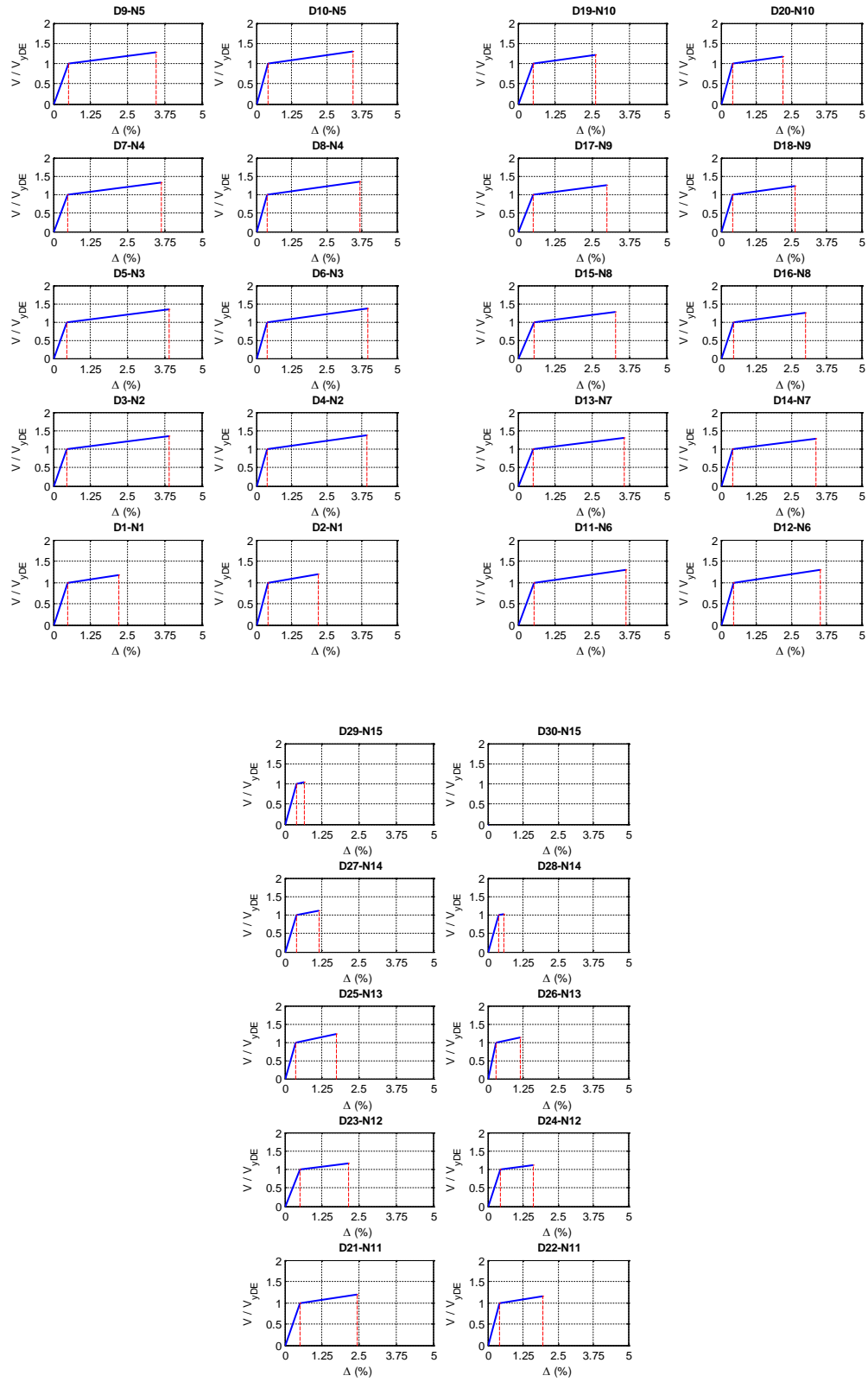


Figura A.154 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

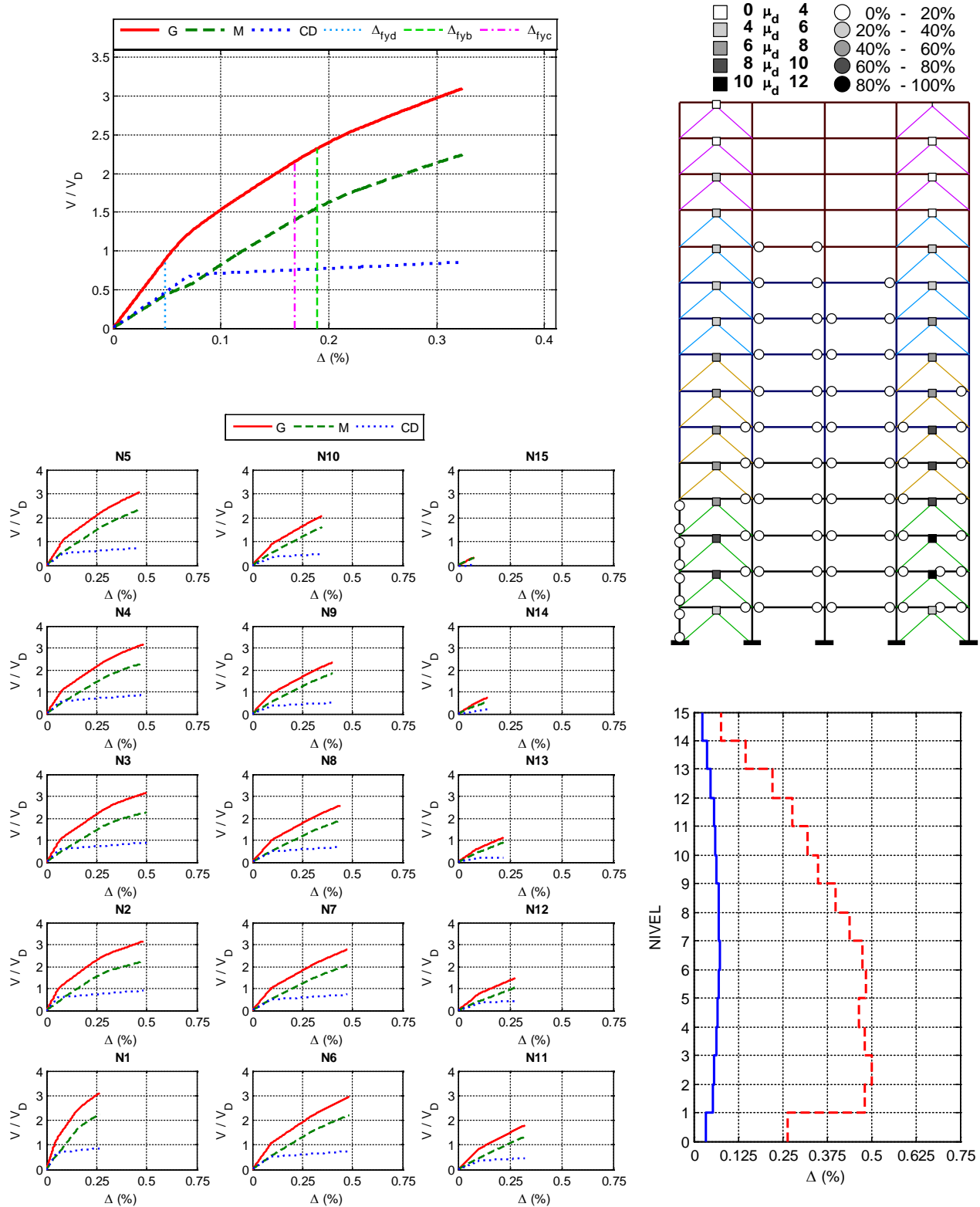


Figura A.155 $N = 15$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

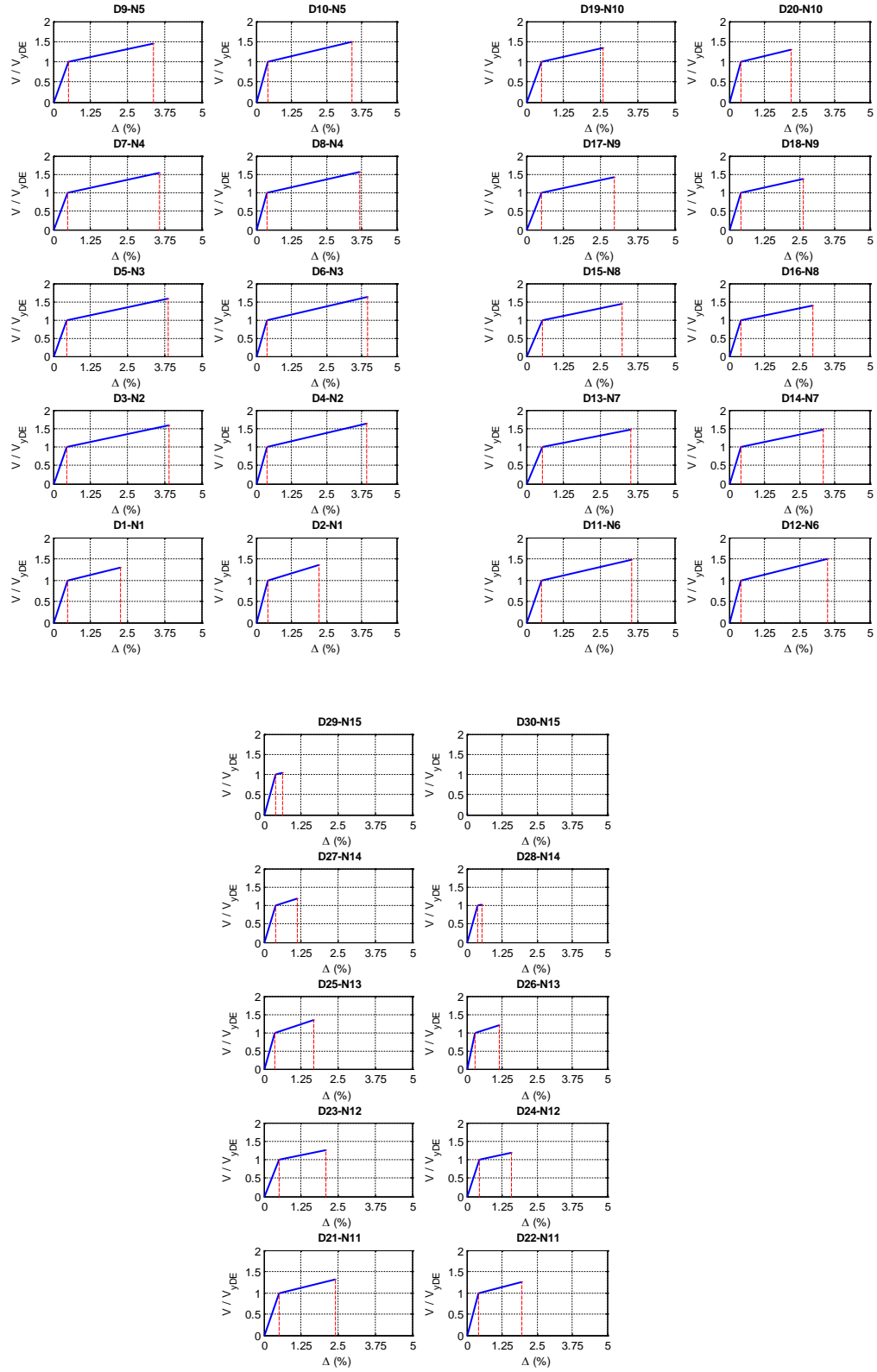


Figura A.156 $N = 15, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

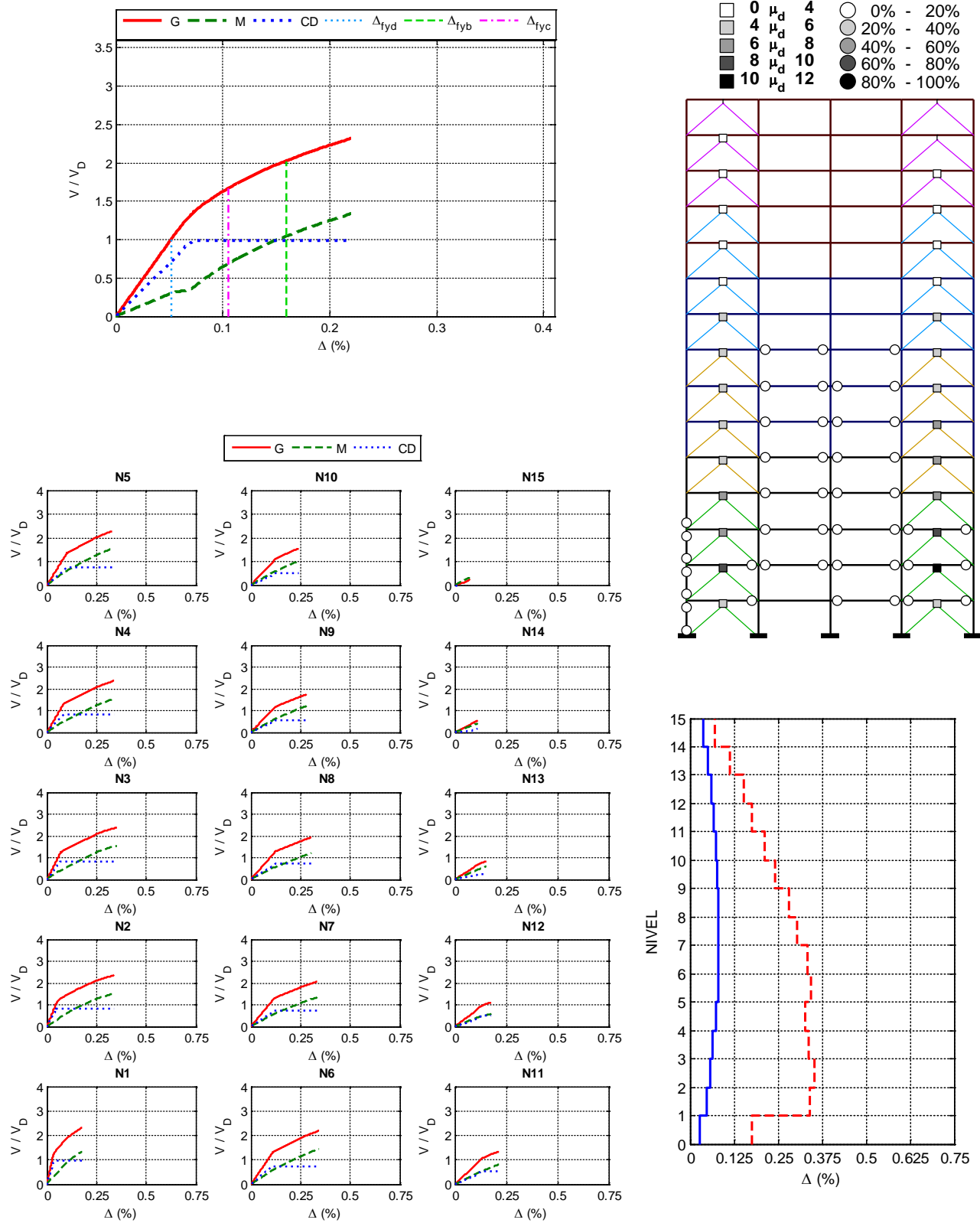


Figura A.157 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

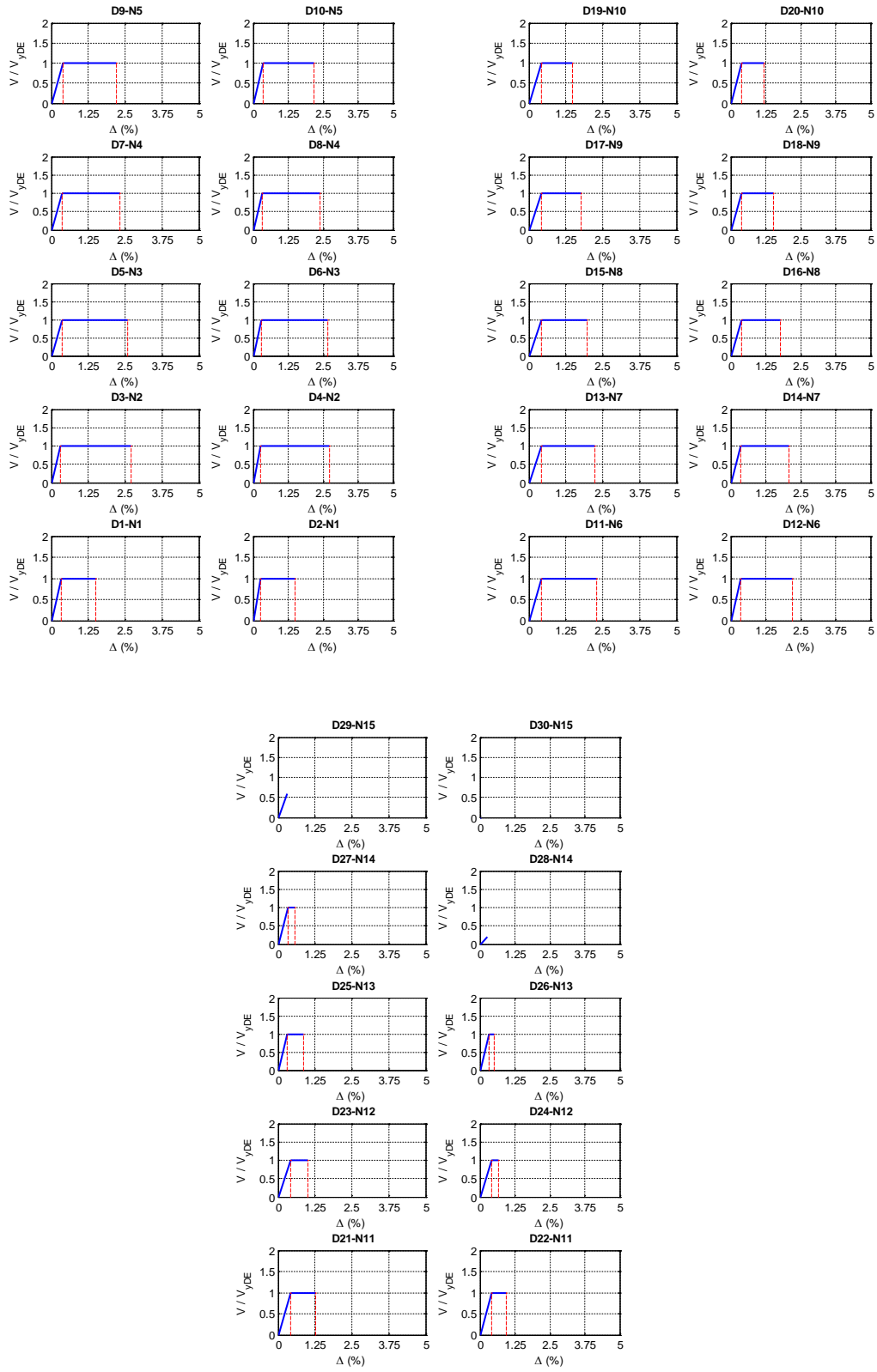


Figura A.158 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

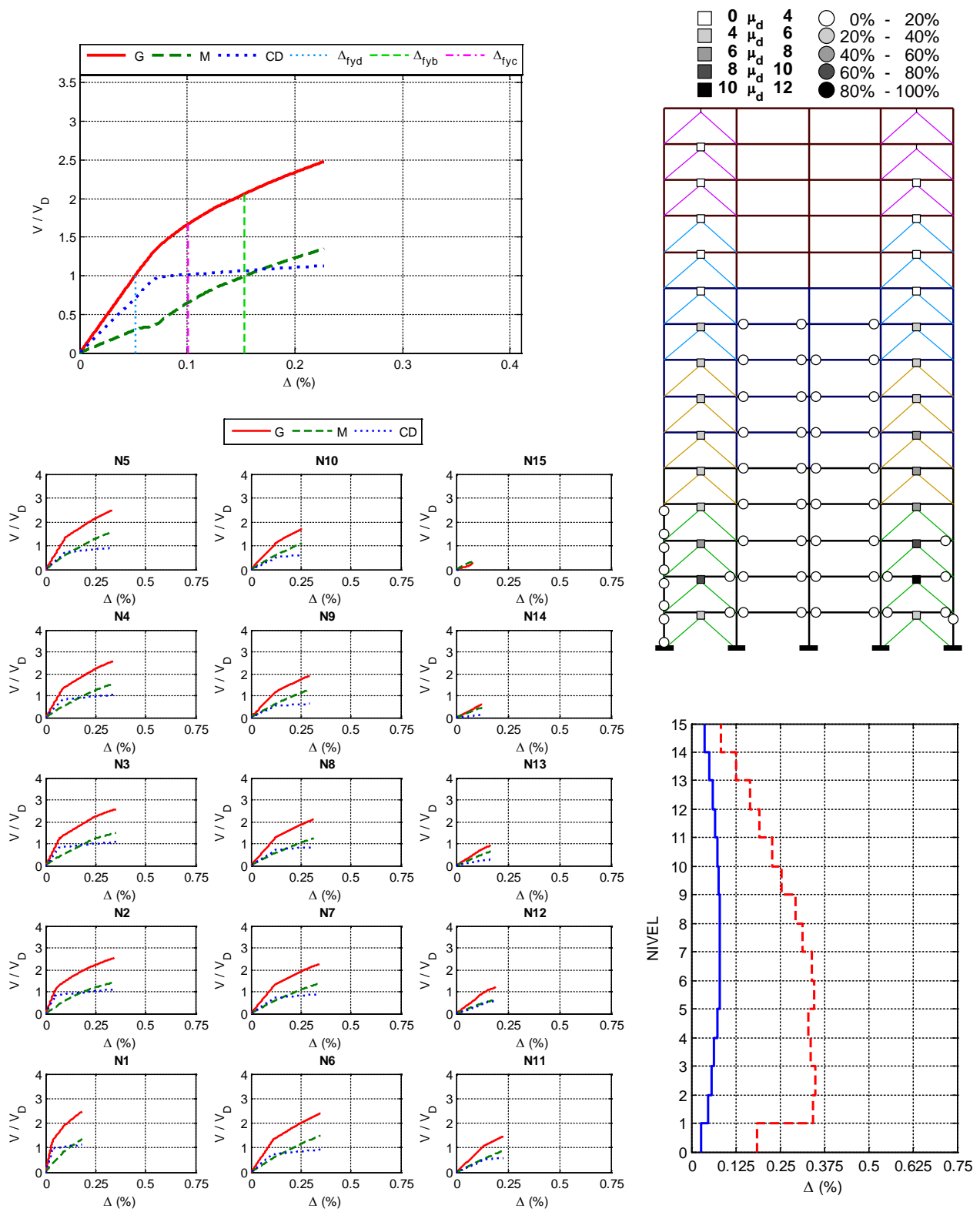


Figura A.159 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

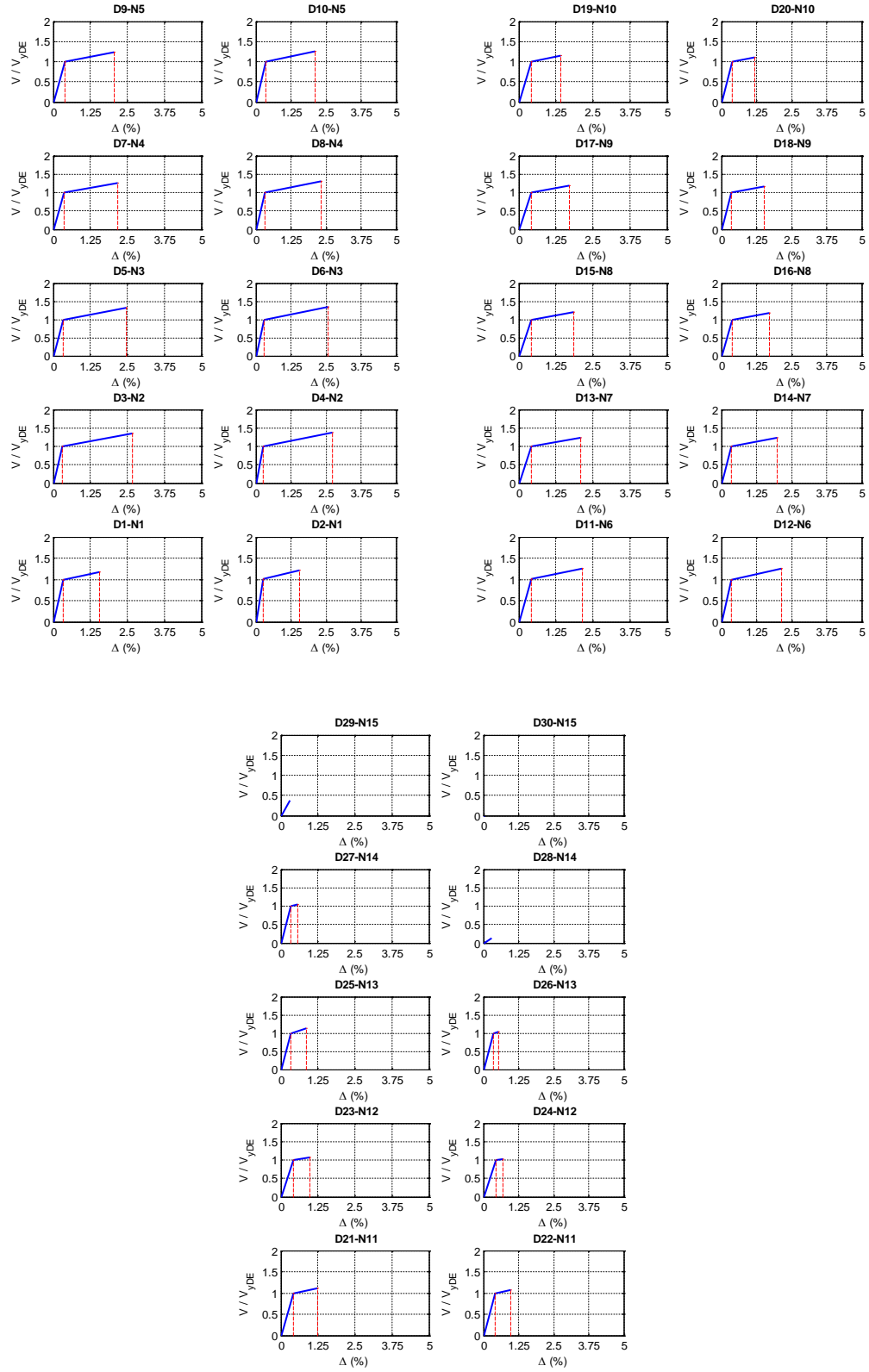


Figura A.160 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

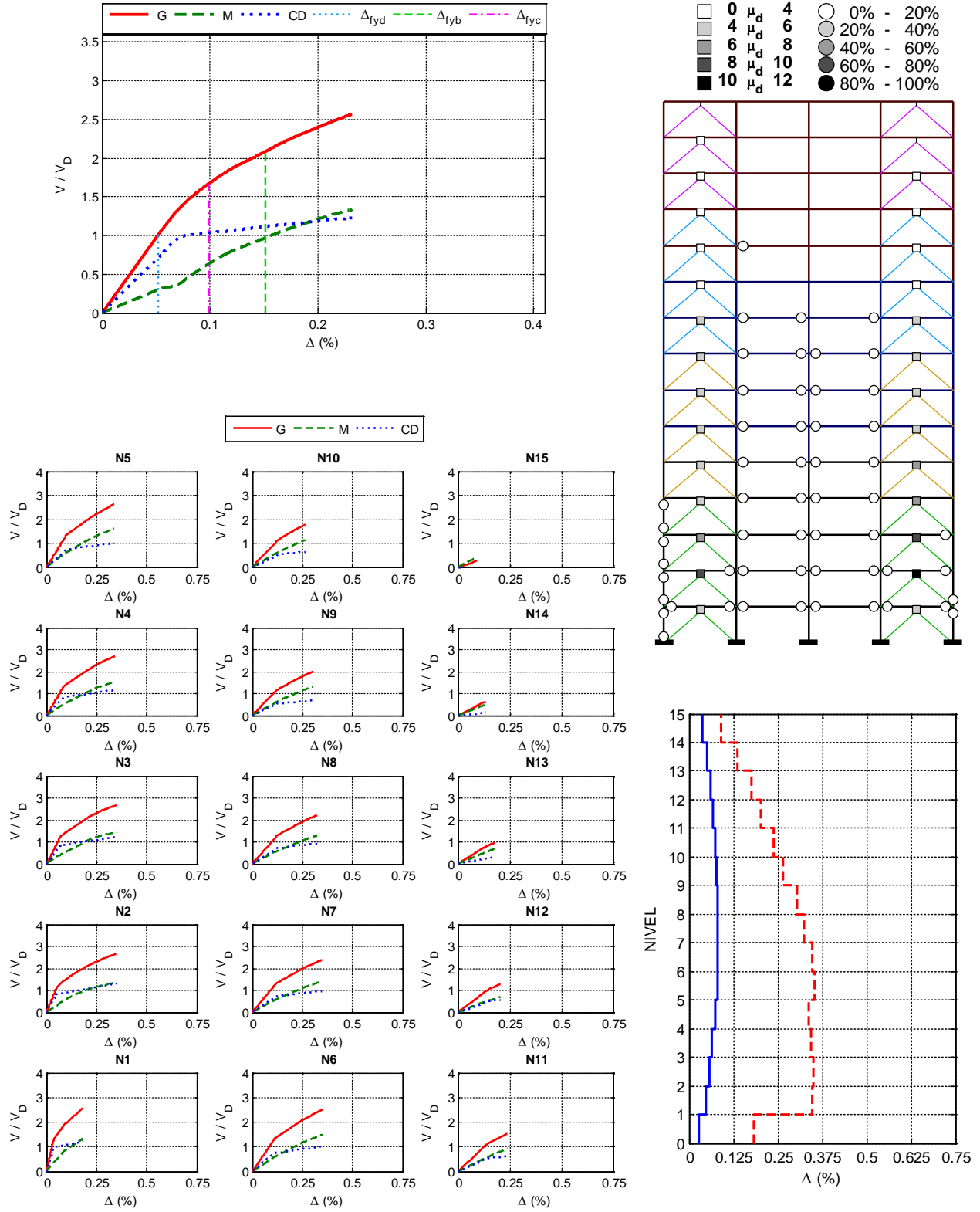


Figura A.161 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

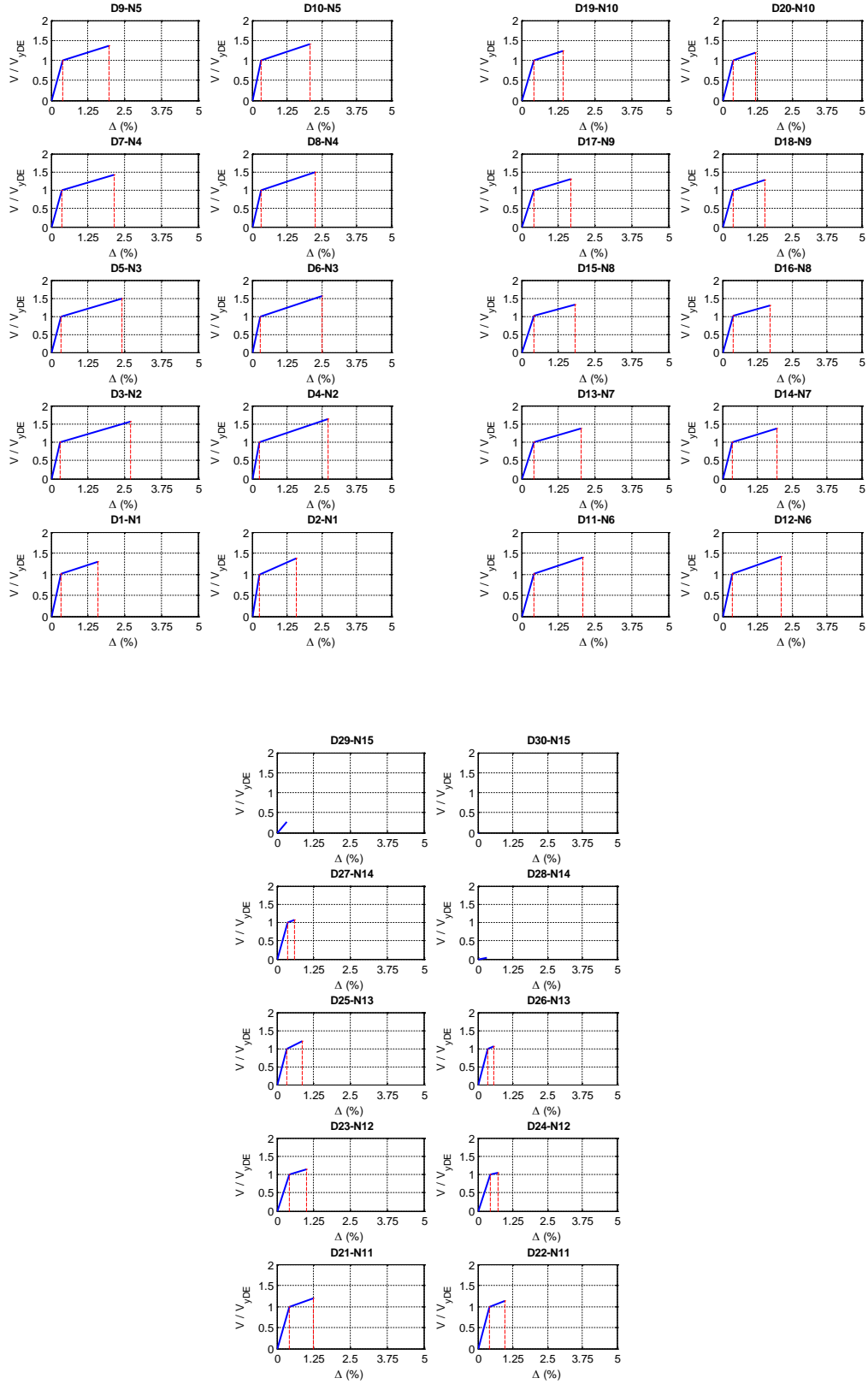


Figura A.162 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

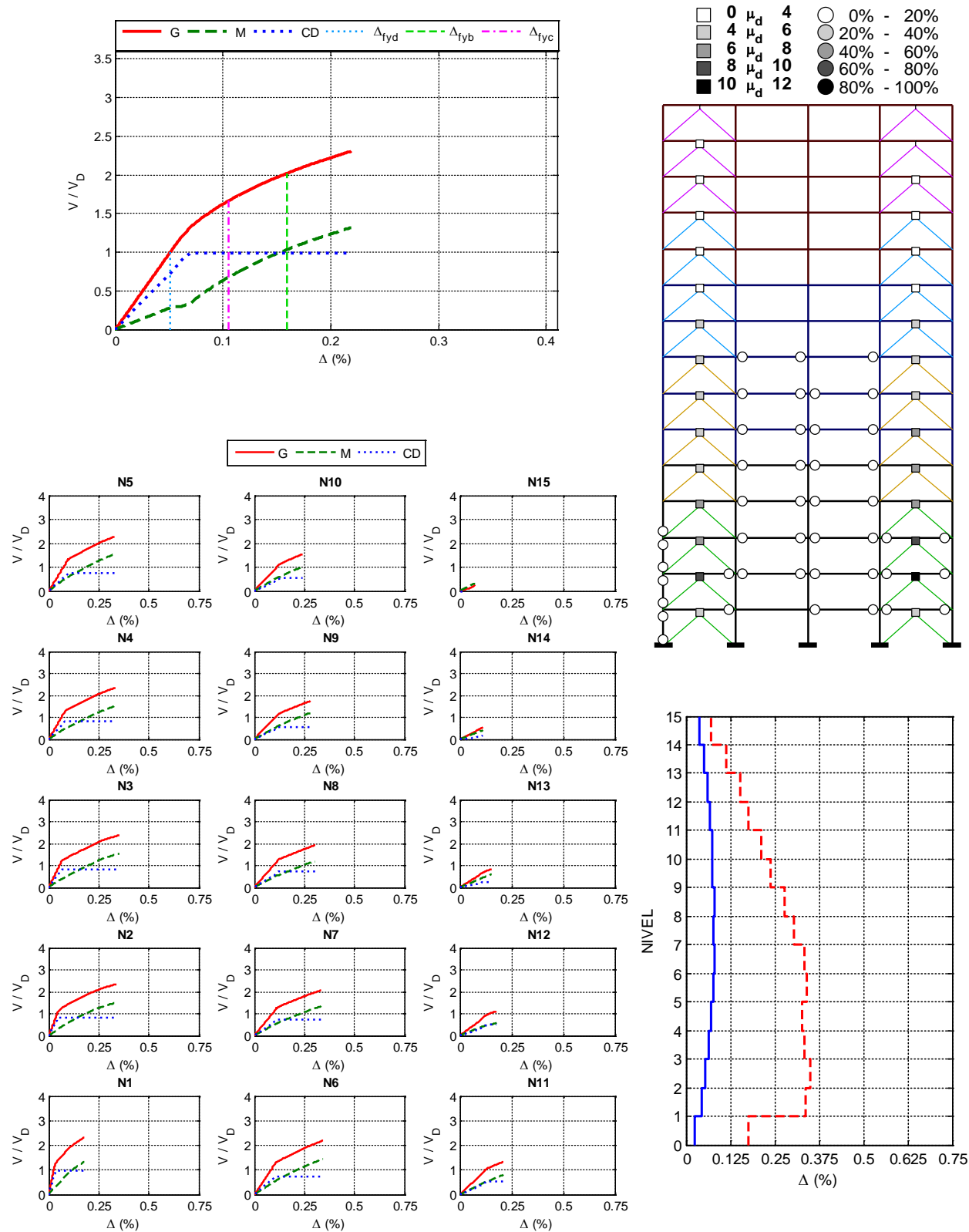


Figura A.163 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

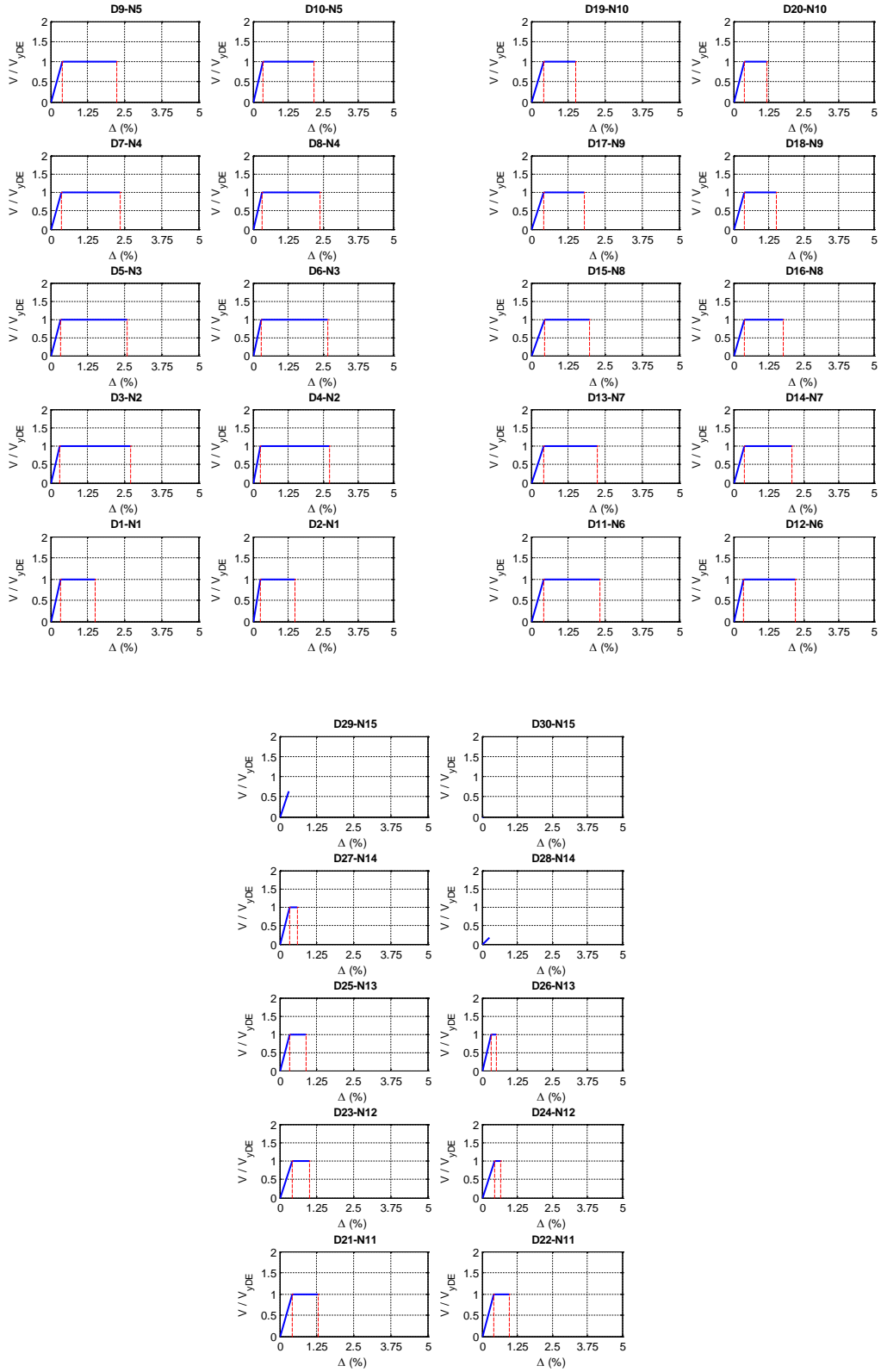


Figura A.164 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

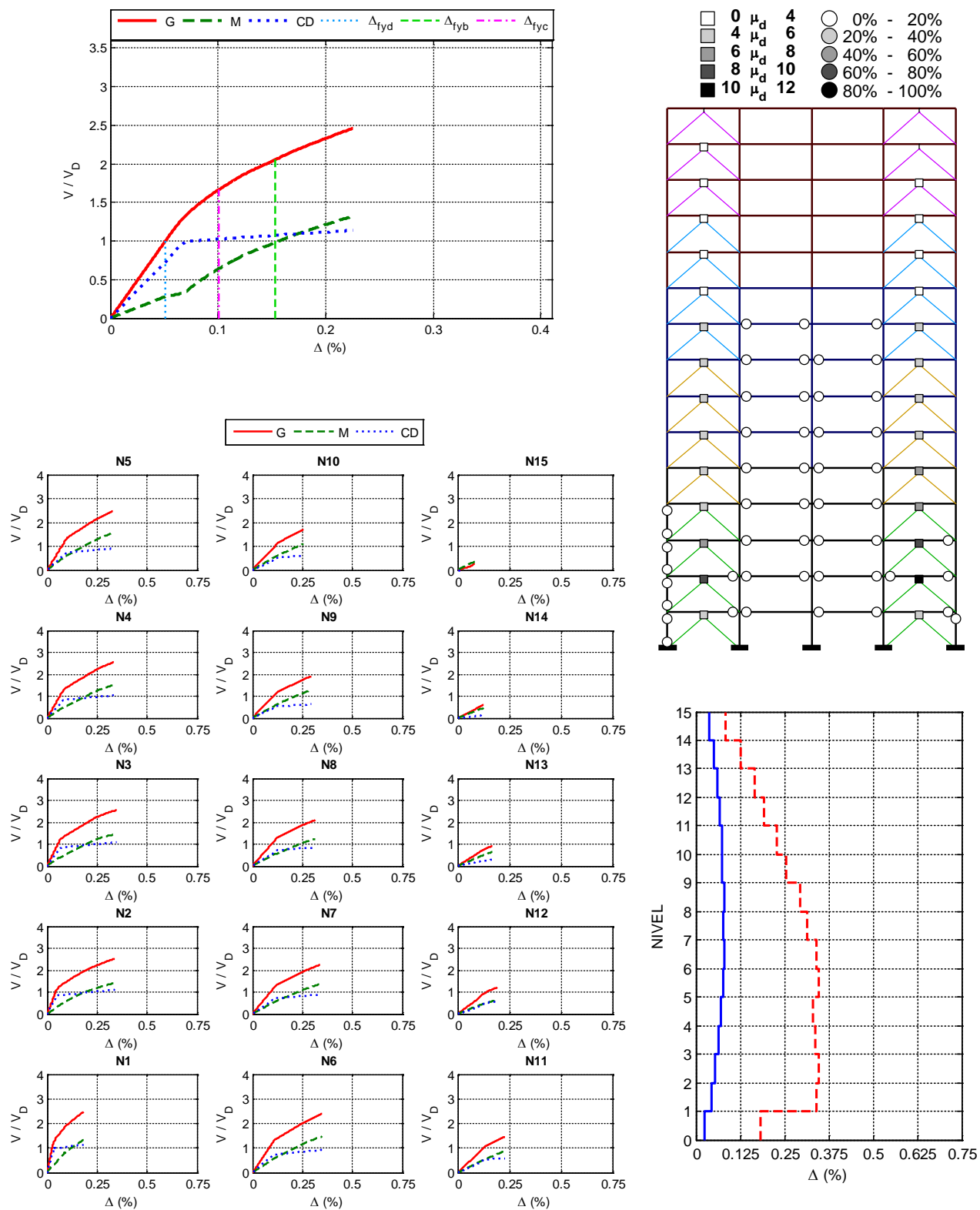


Figura A.165 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

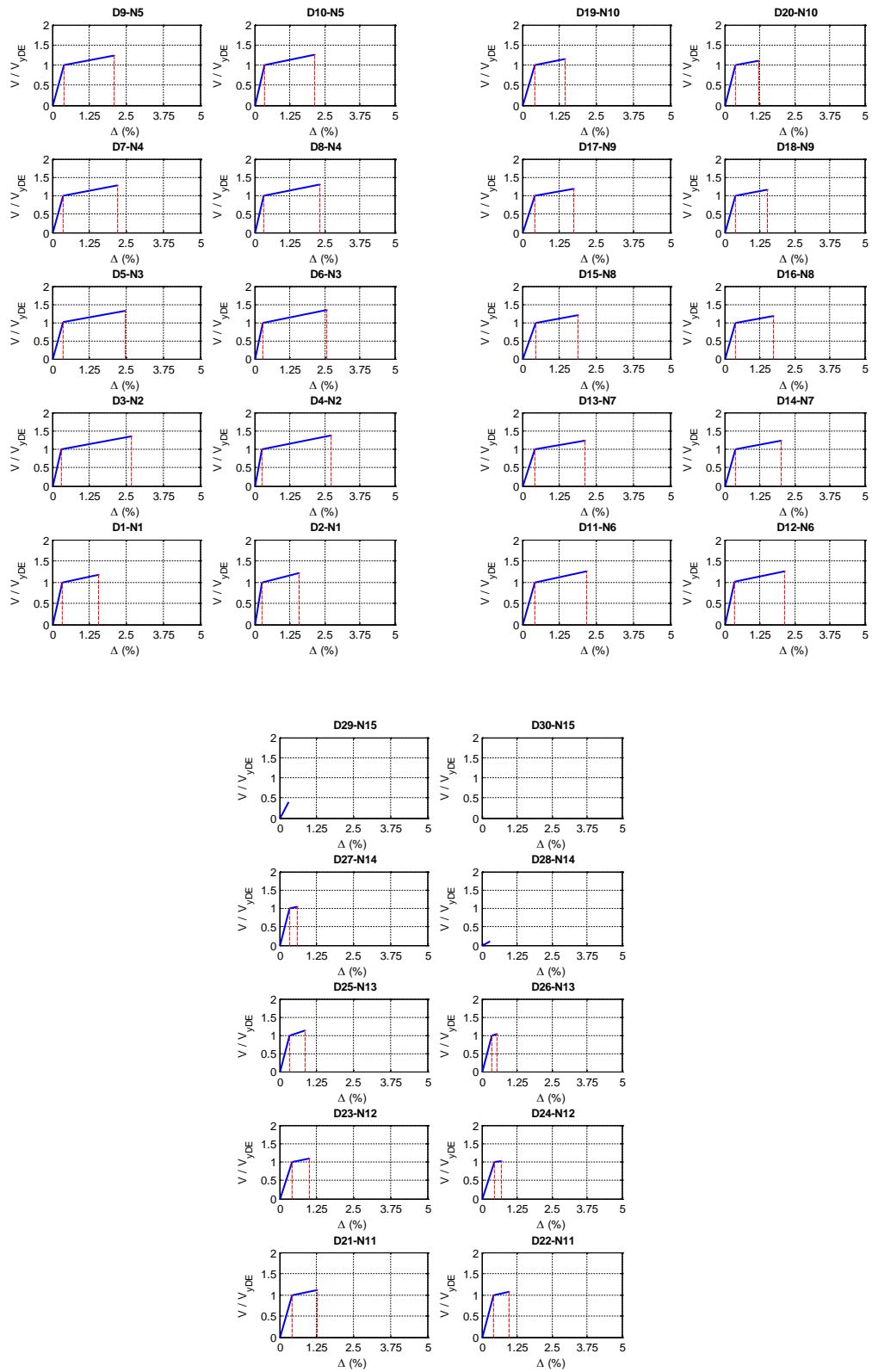


Figura A.166 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

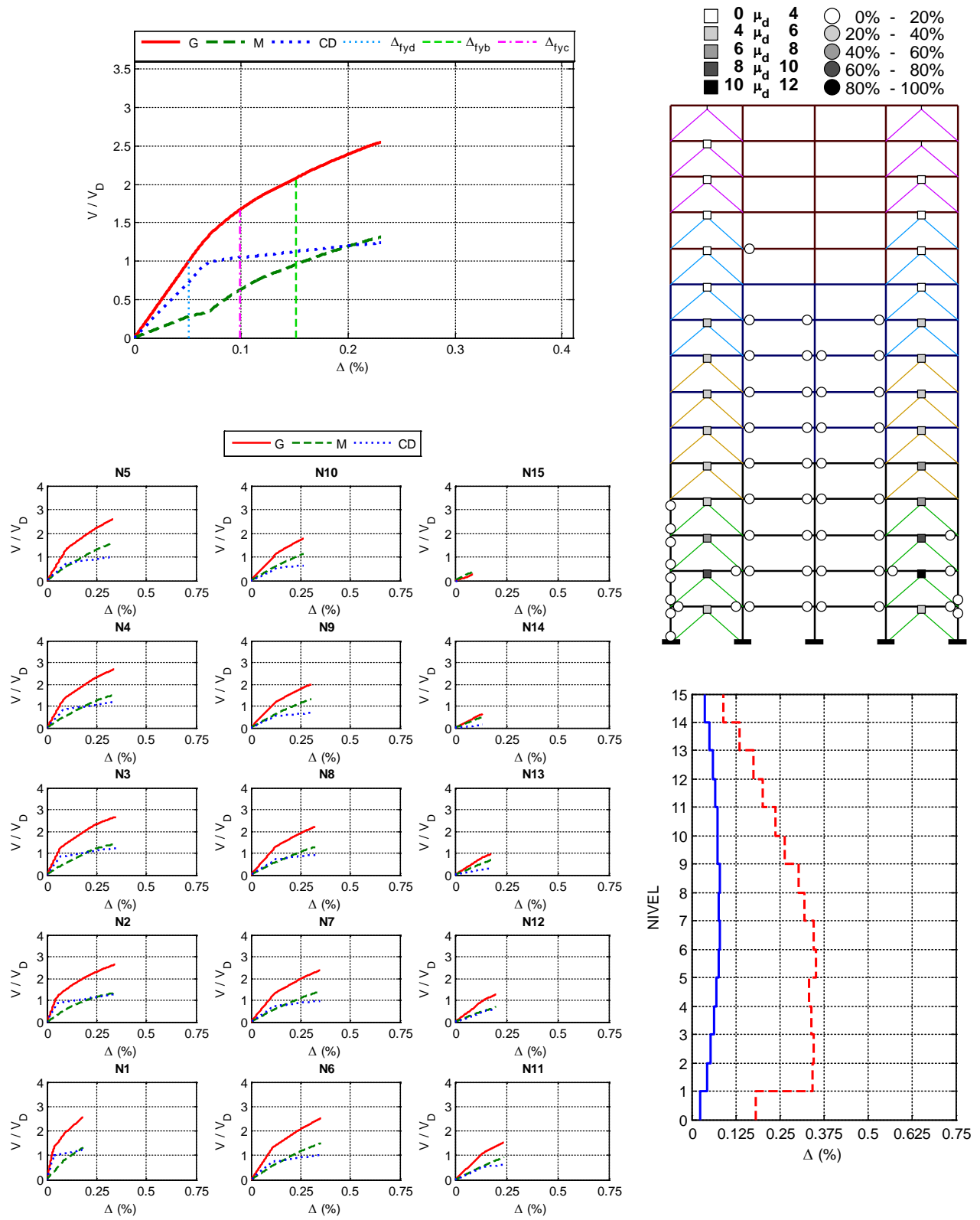


Figura A.167 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

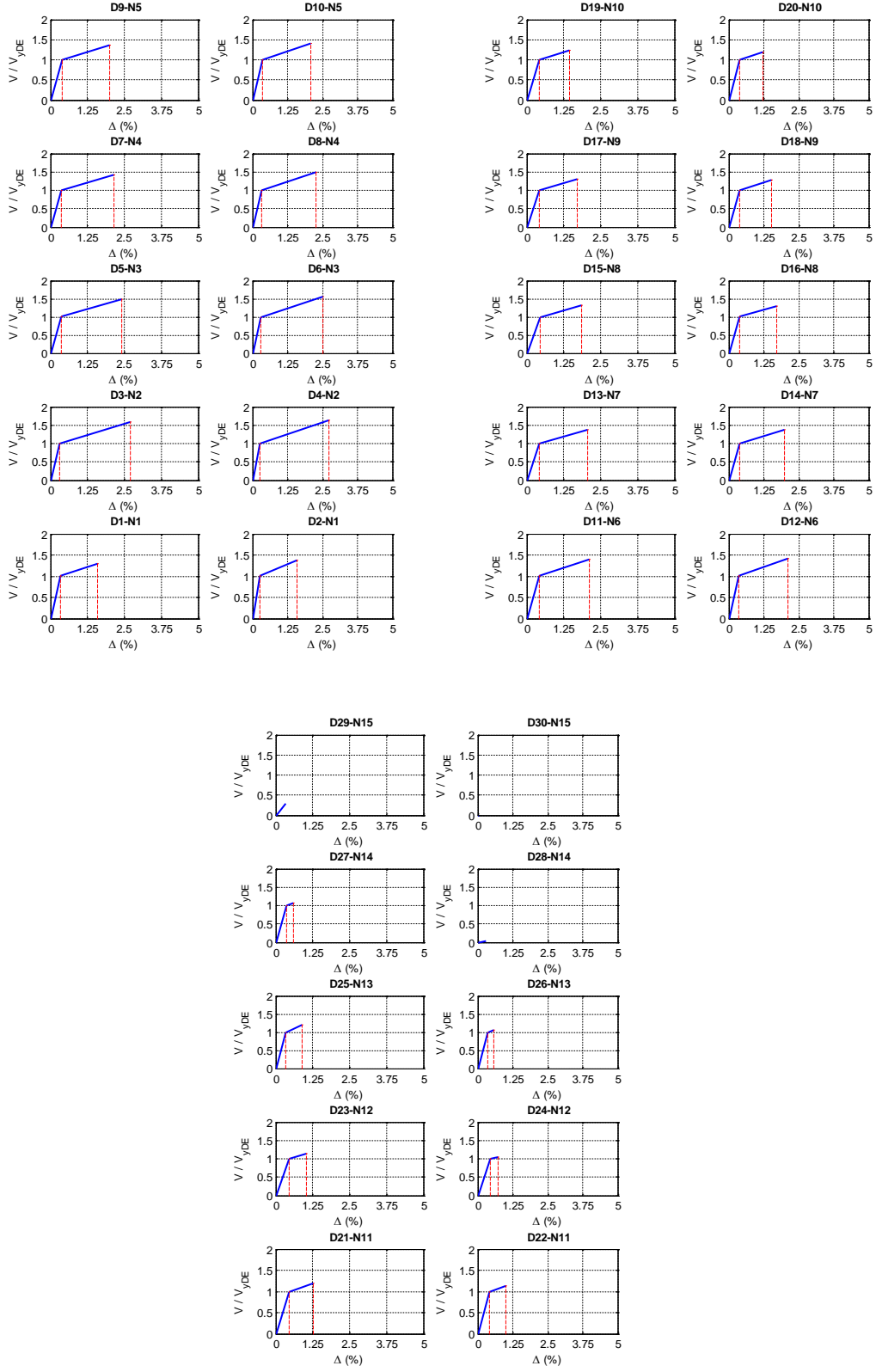


Figura A.168 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

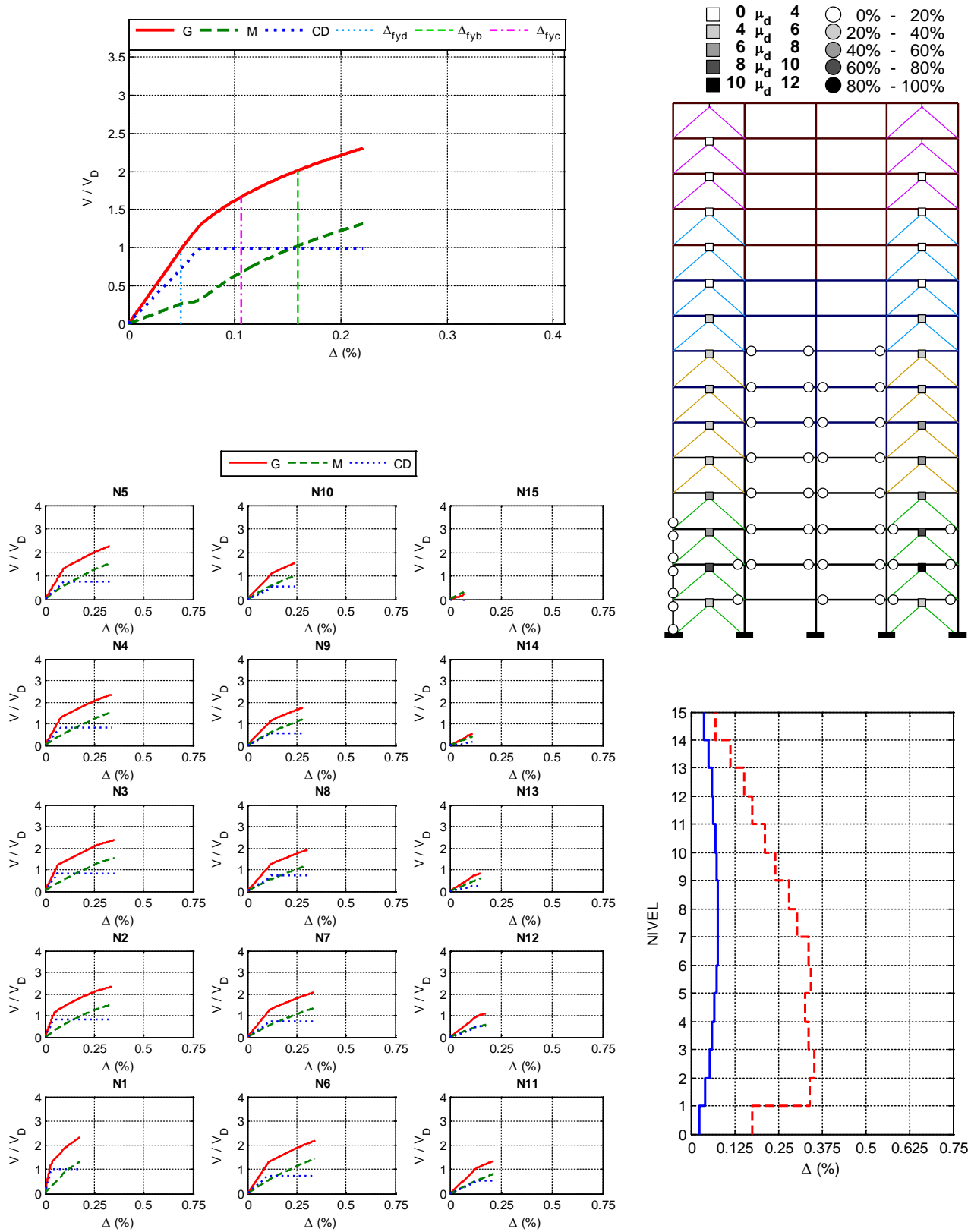


Figura A.169 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

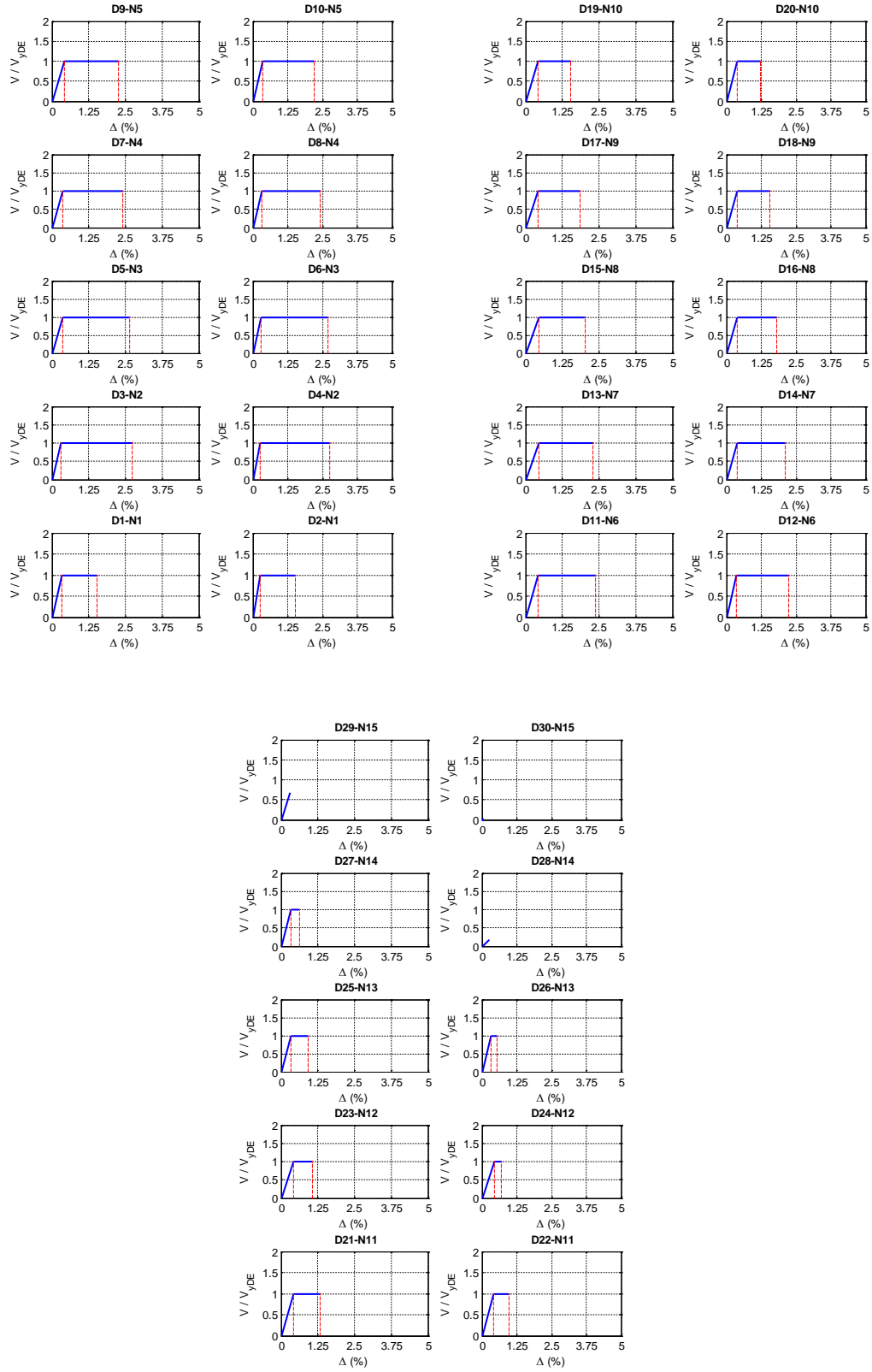


Figura A.170 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

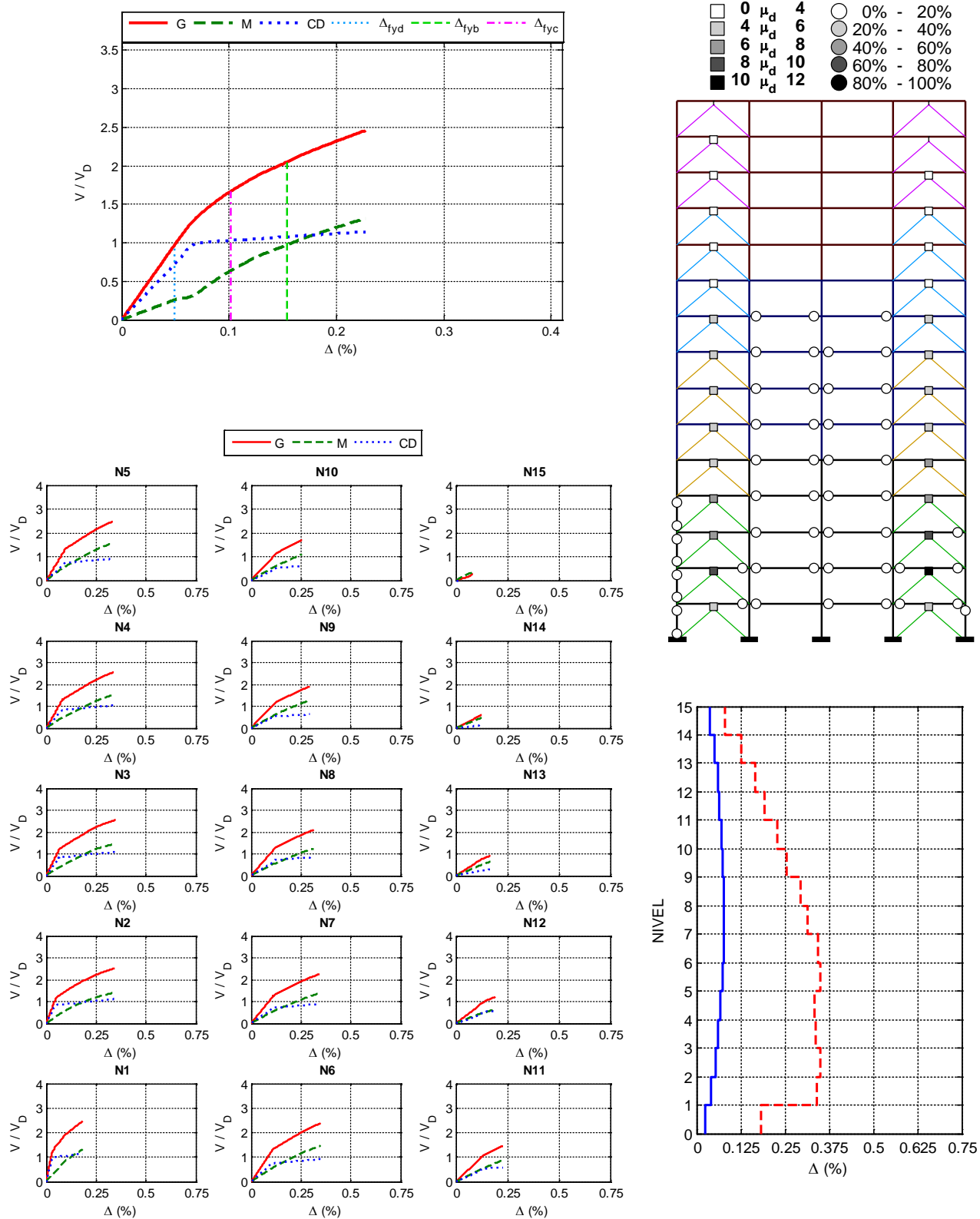


Figura A.171 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

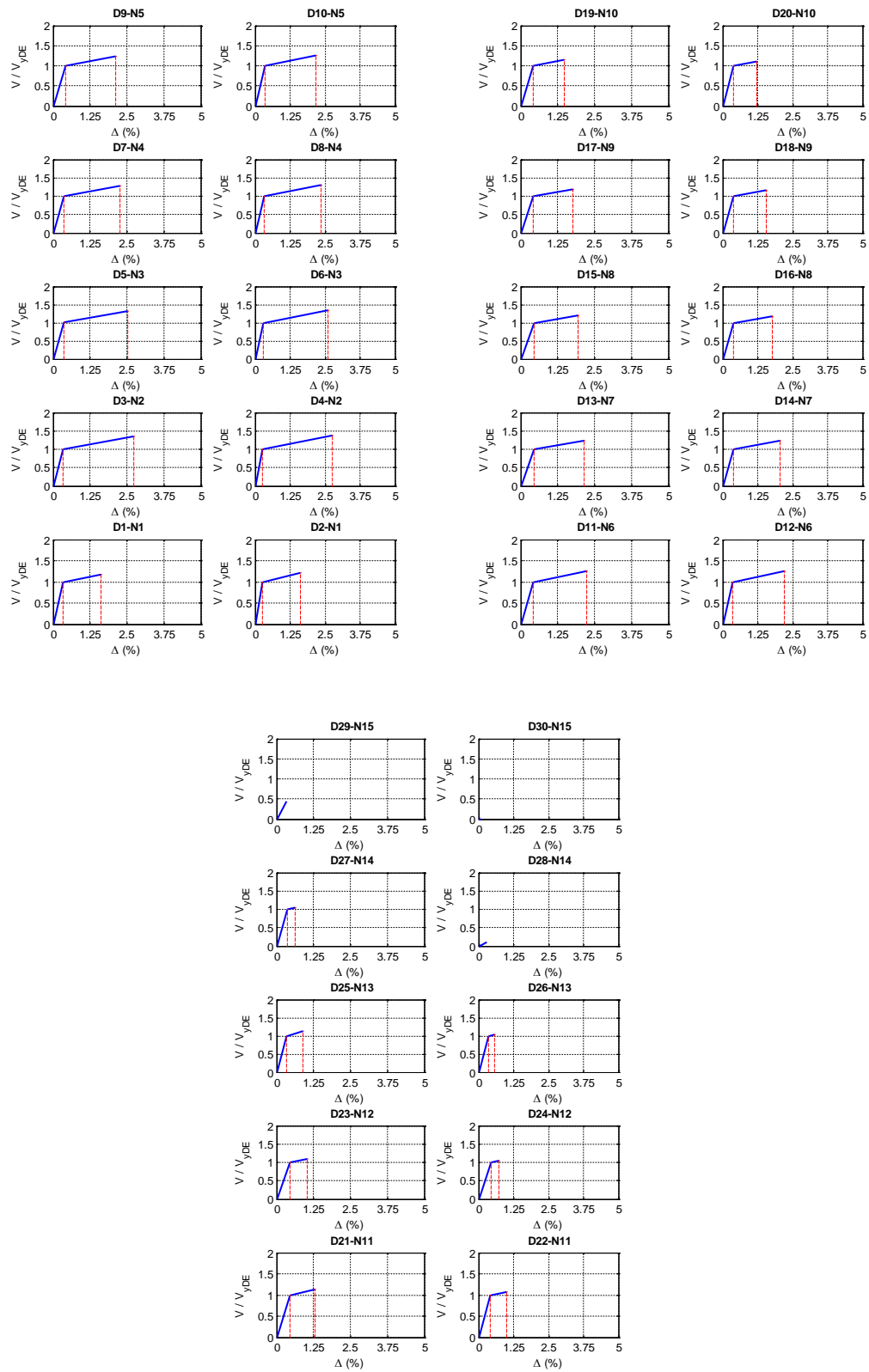


Figura A.172 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

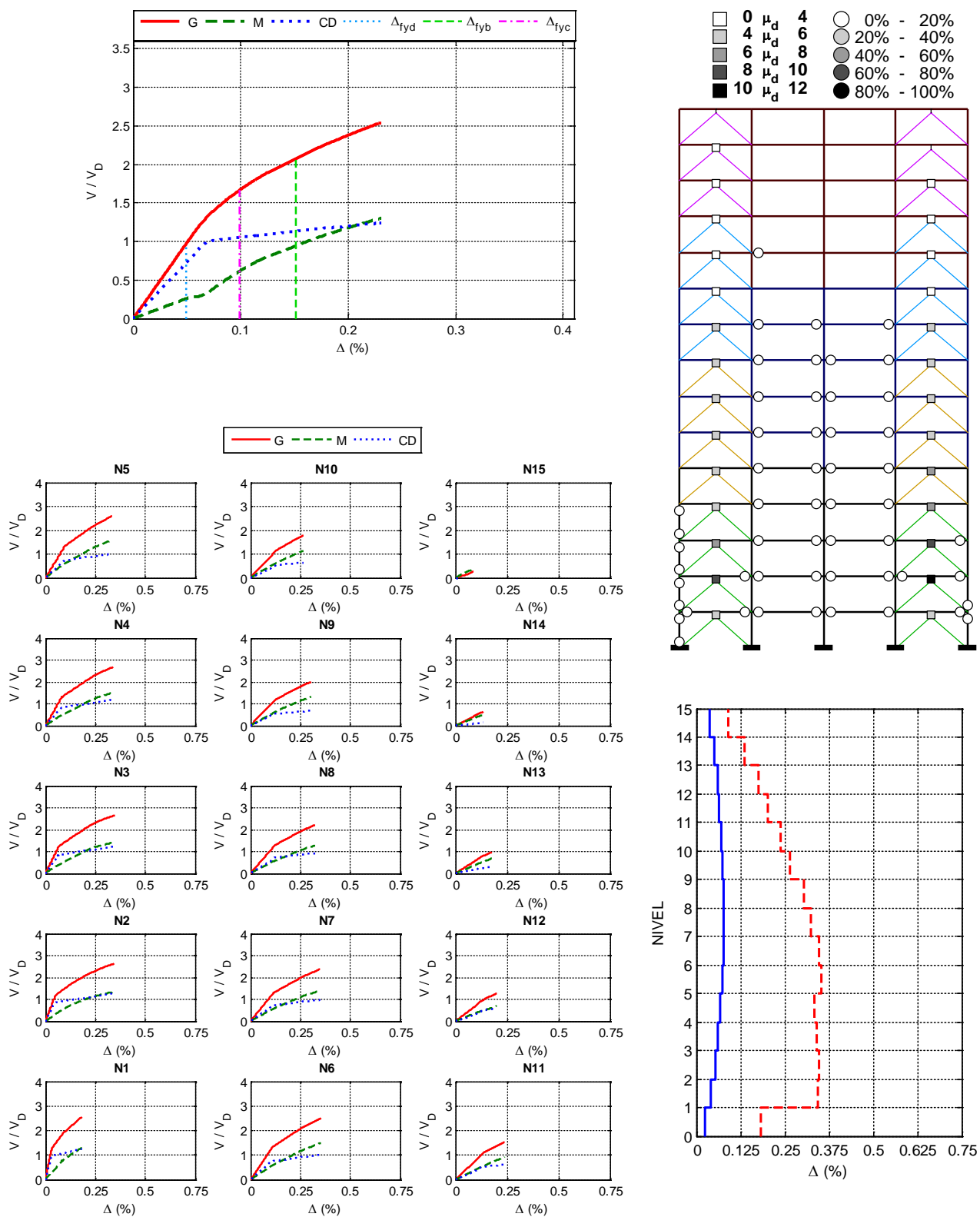


Figura A.173 $N = 15$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

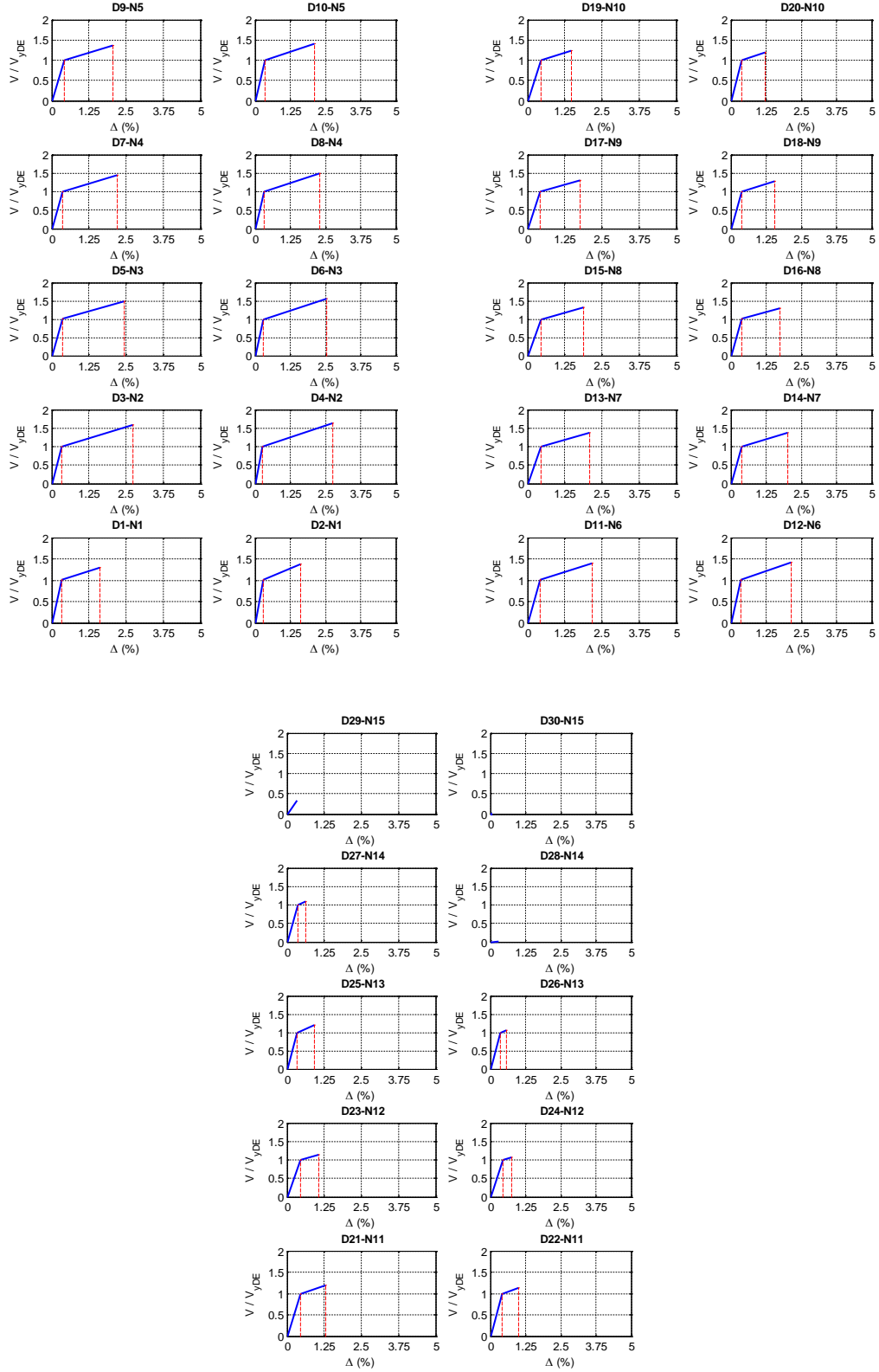


Figura A.174 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

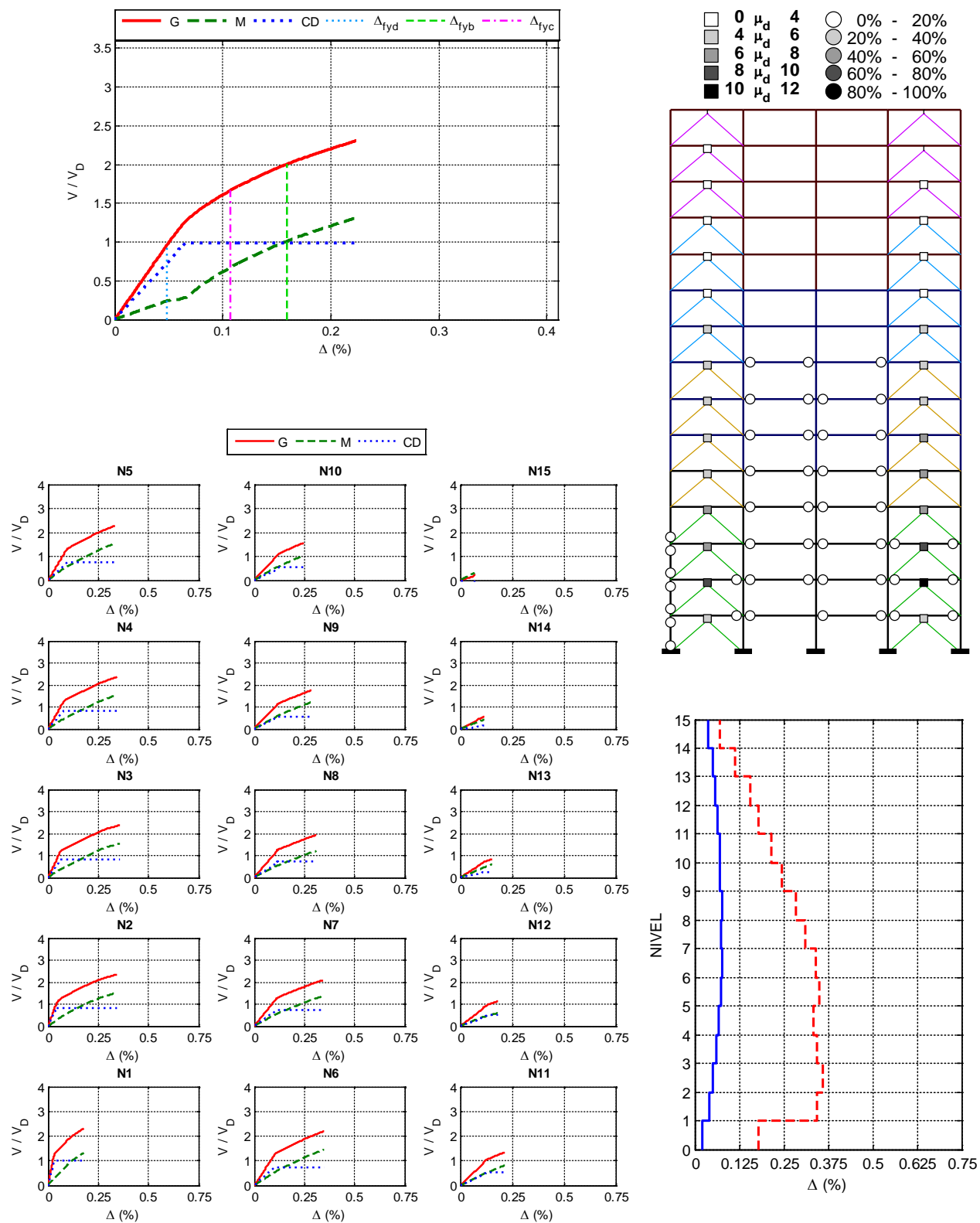


Figura A.175 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

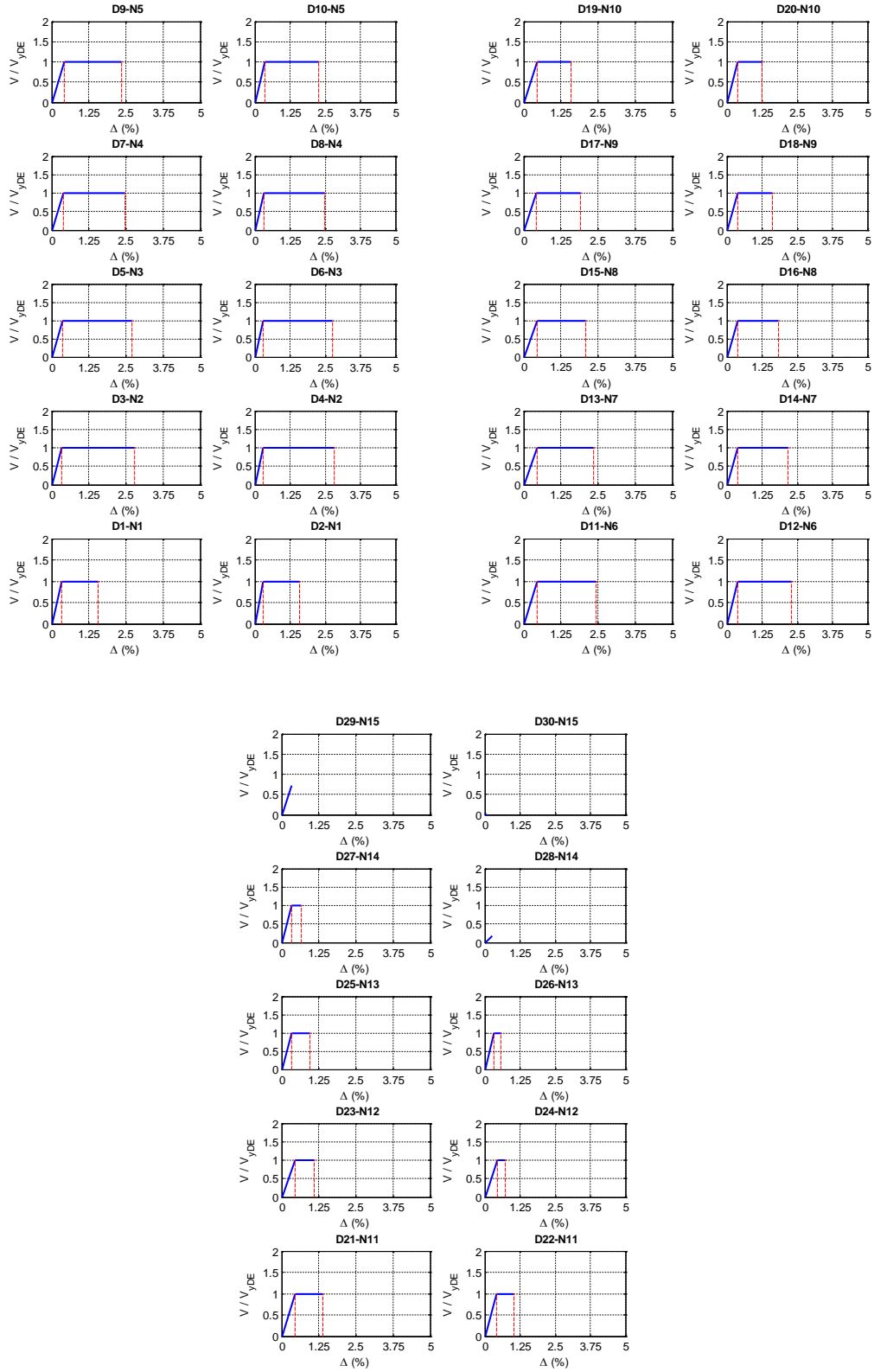


Figura A.176 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

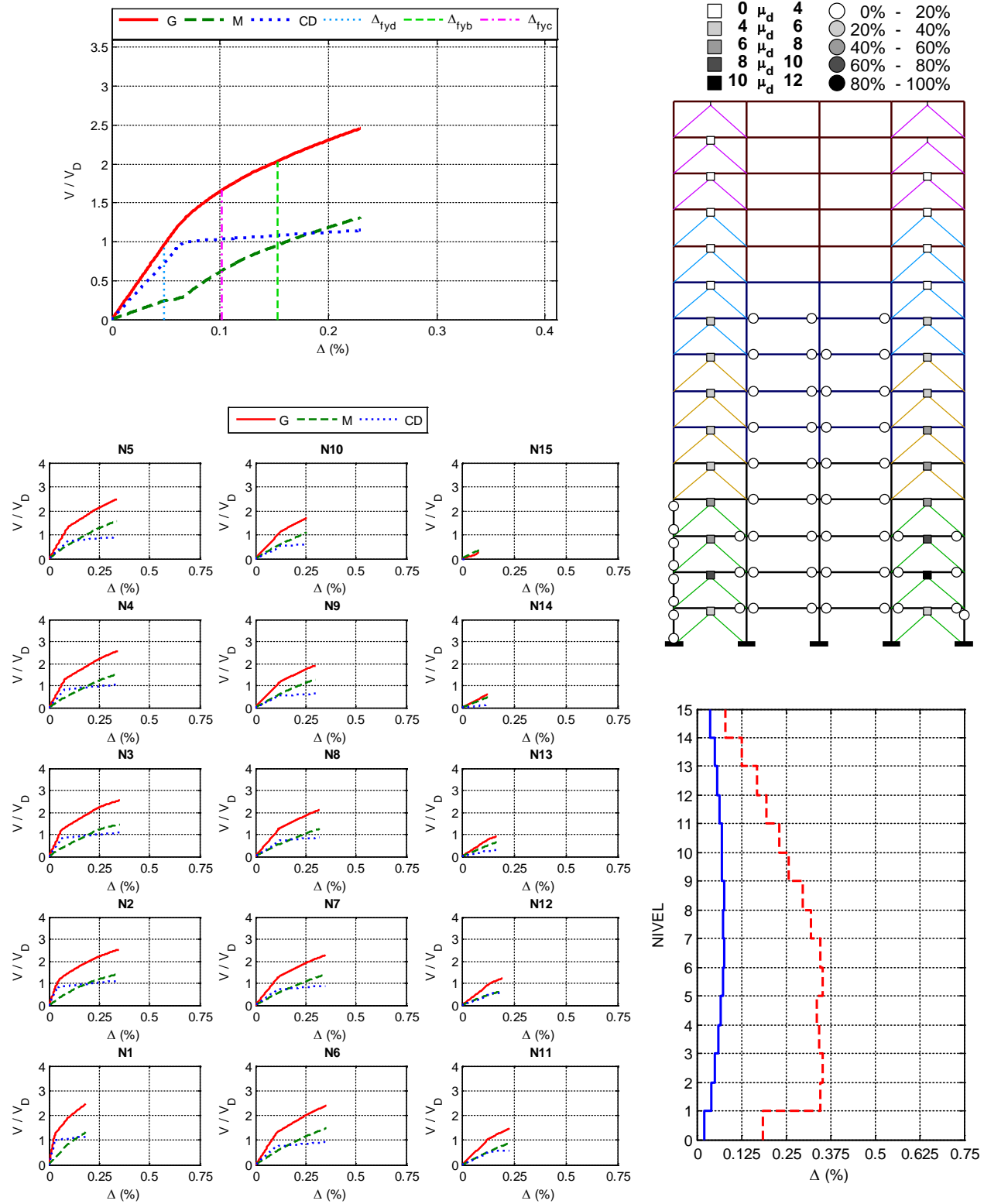


Figura A.177 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

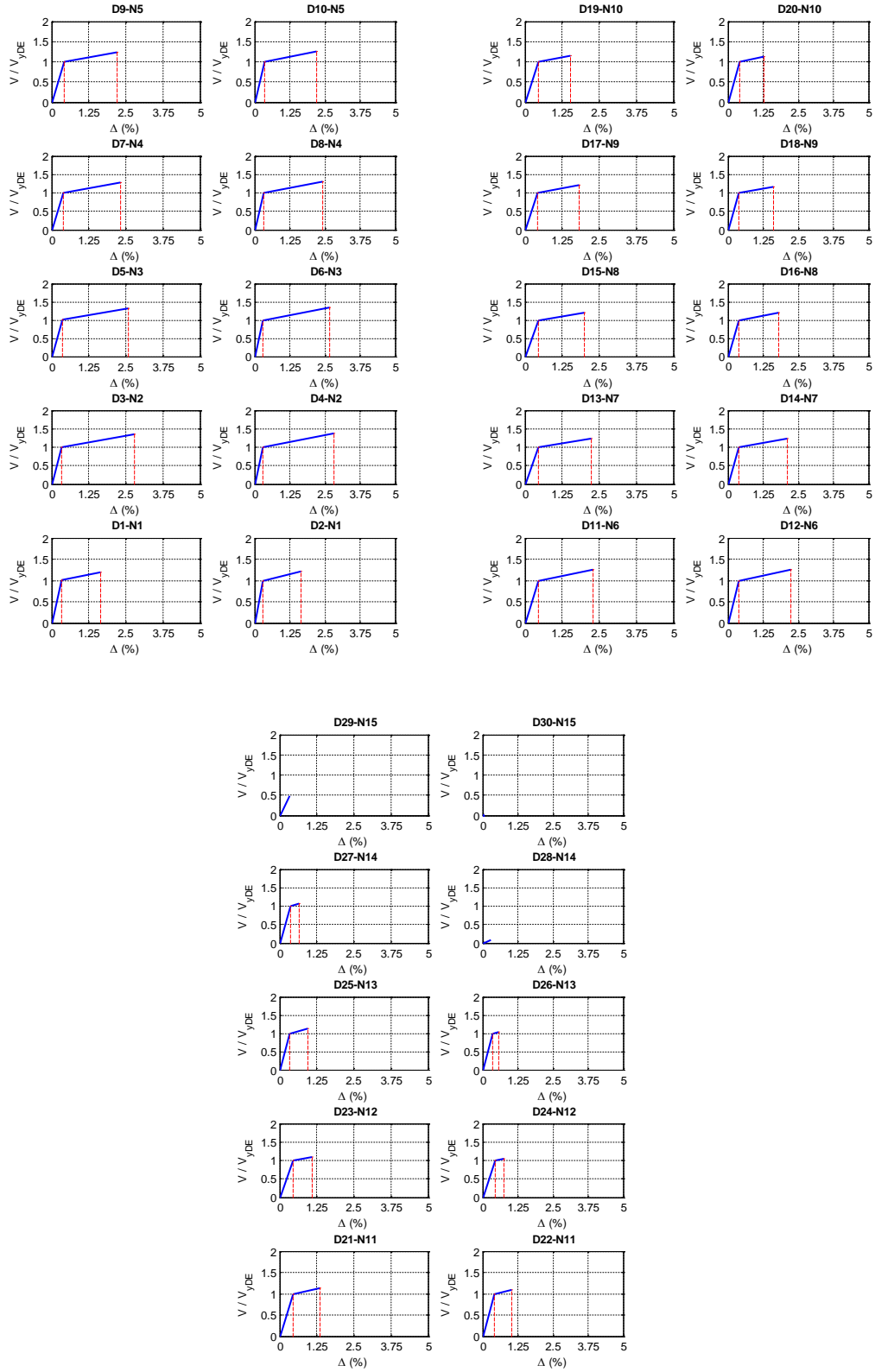


Figura A.178 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

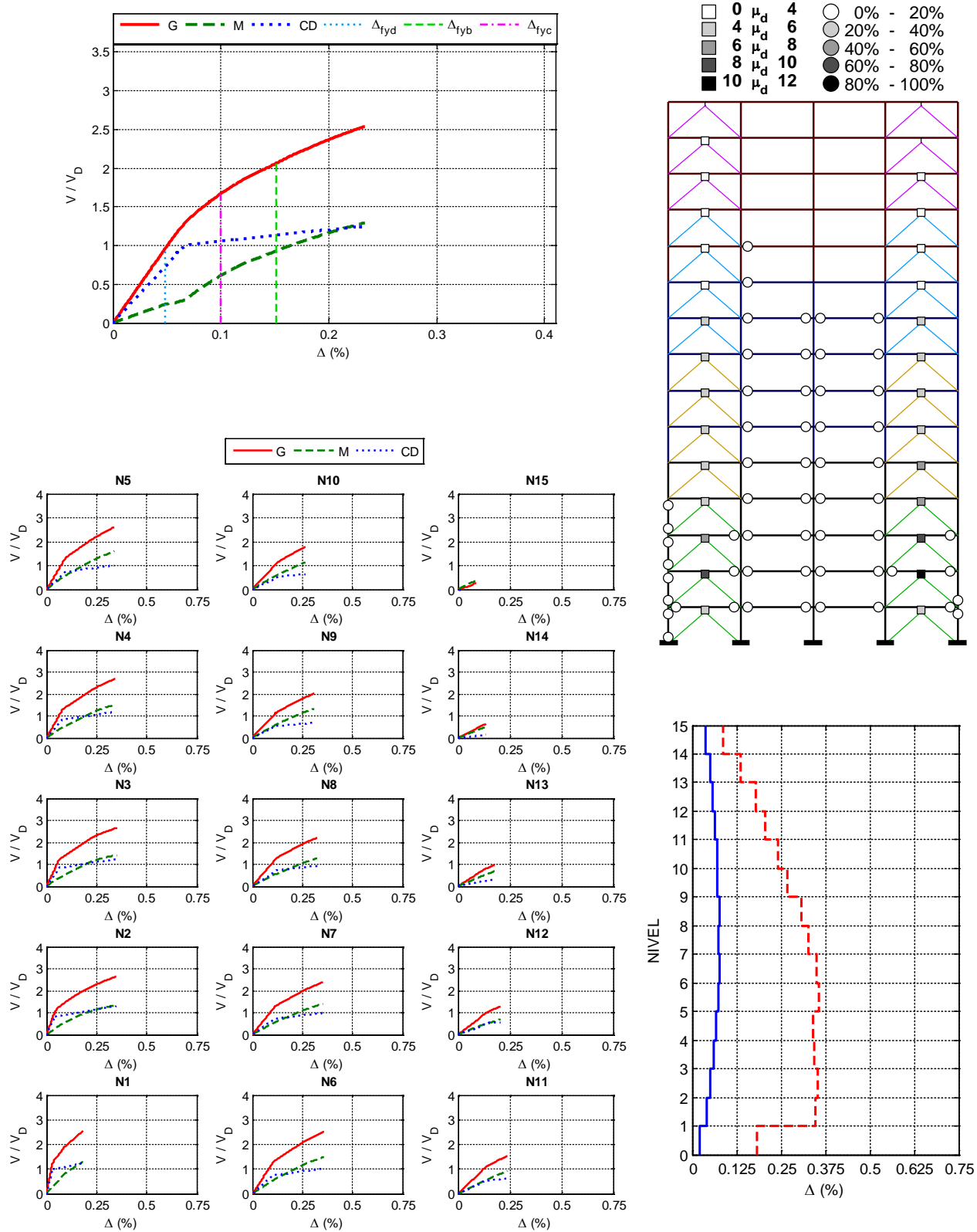


Figura A.179 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

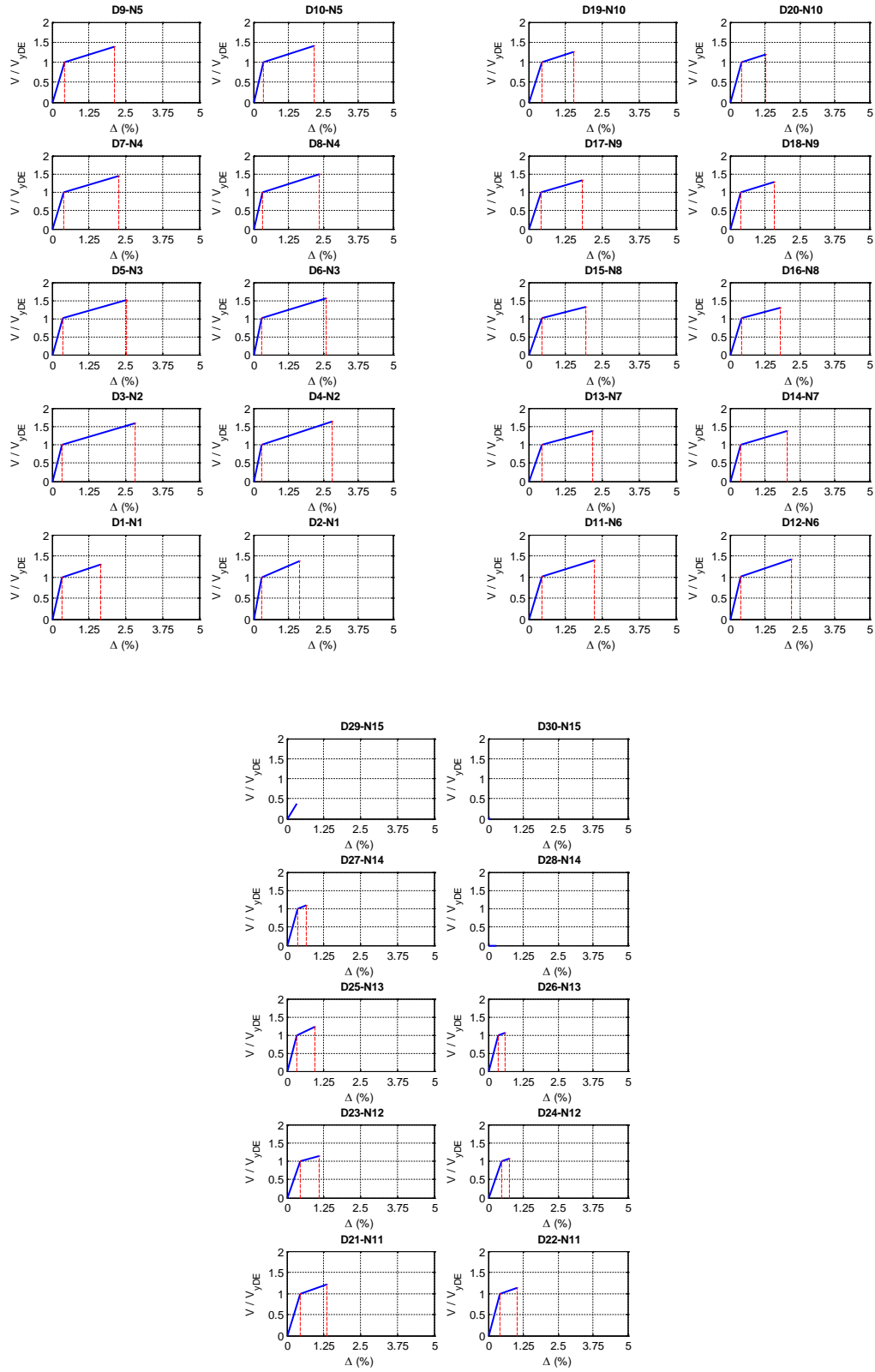


Figura A.180 $N = 15, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

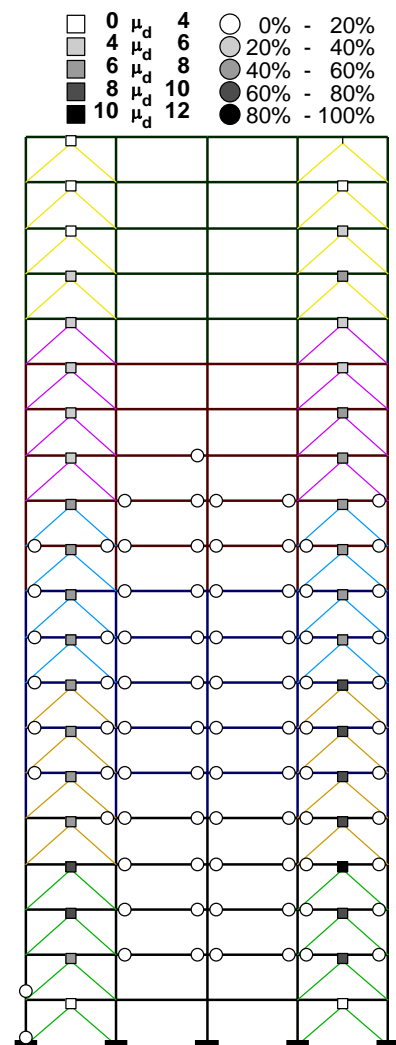
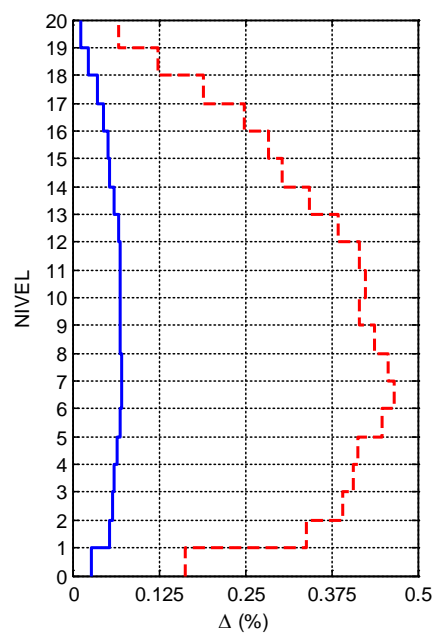
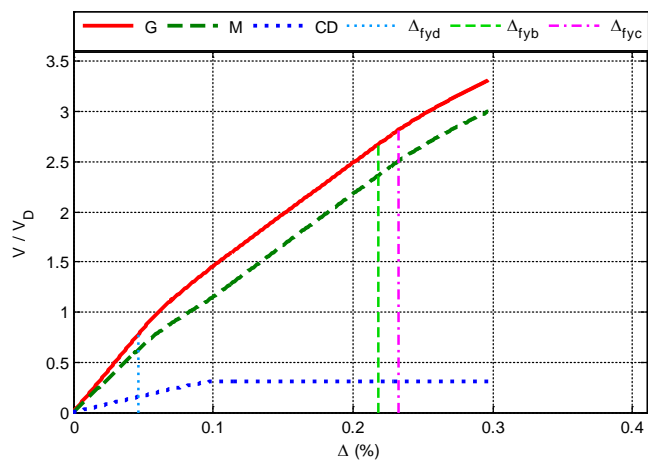


Figura A.181 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

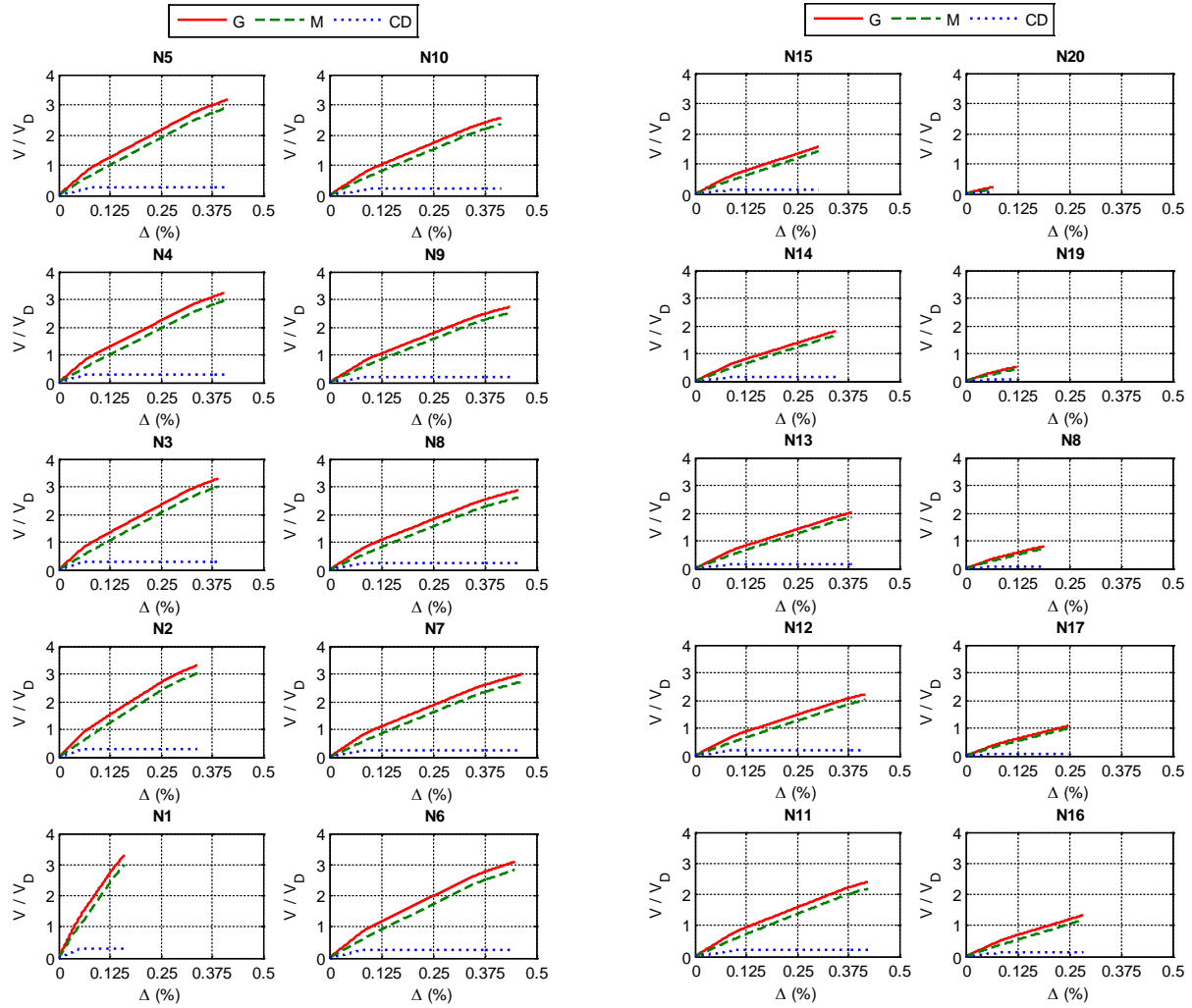


Figura A.182 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

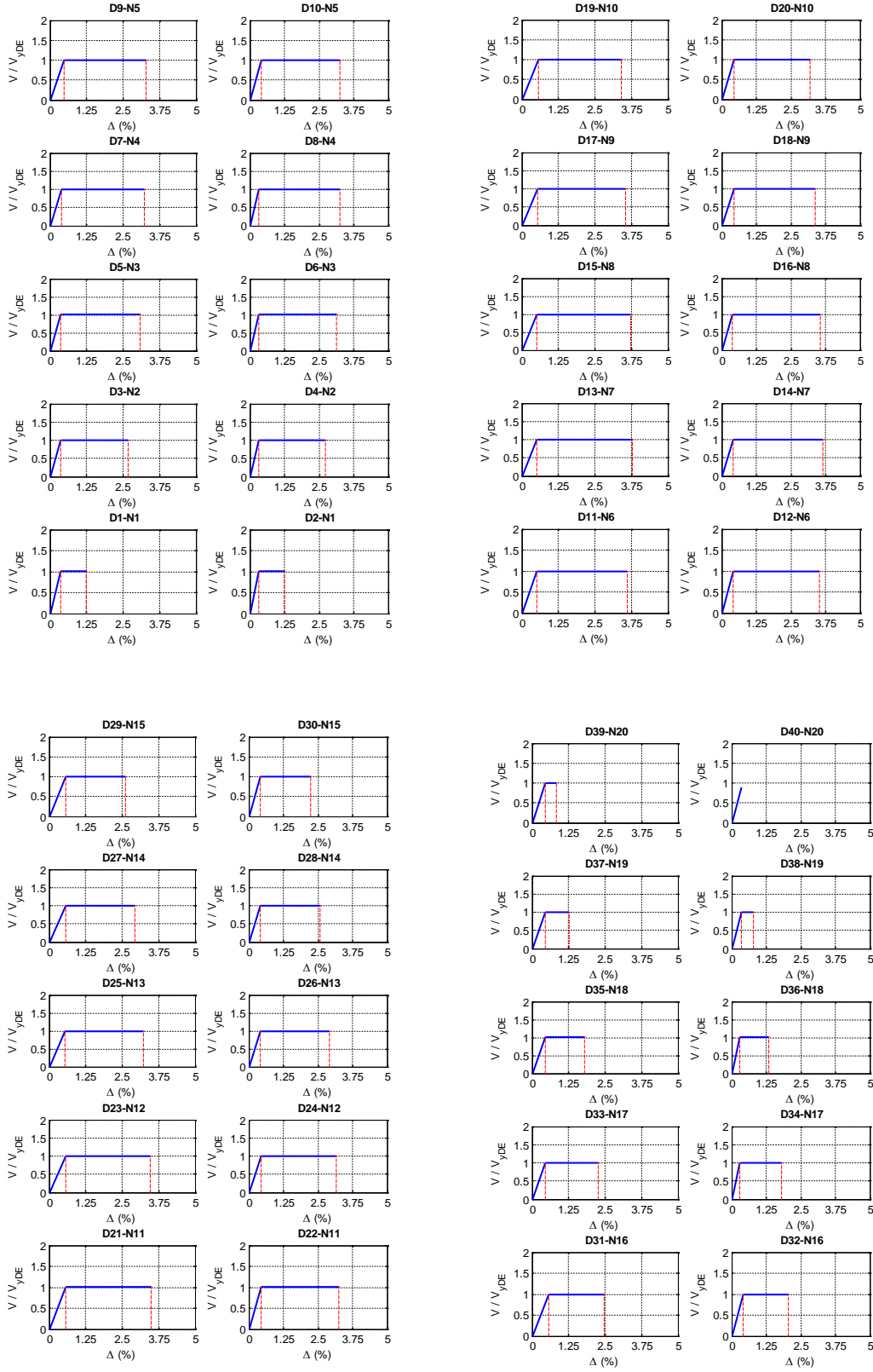


Figura A.183 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

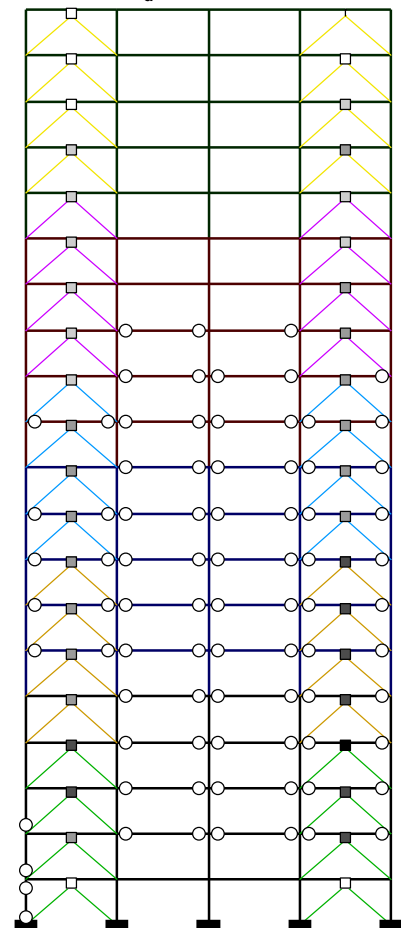
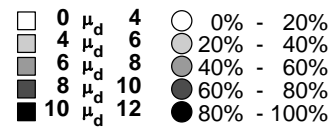
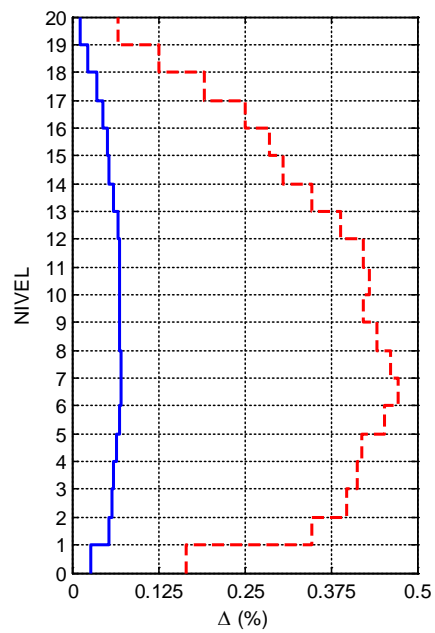
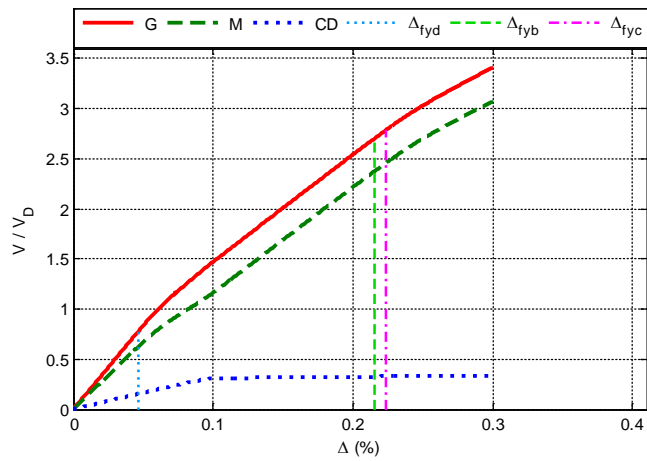


Figura A.184 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

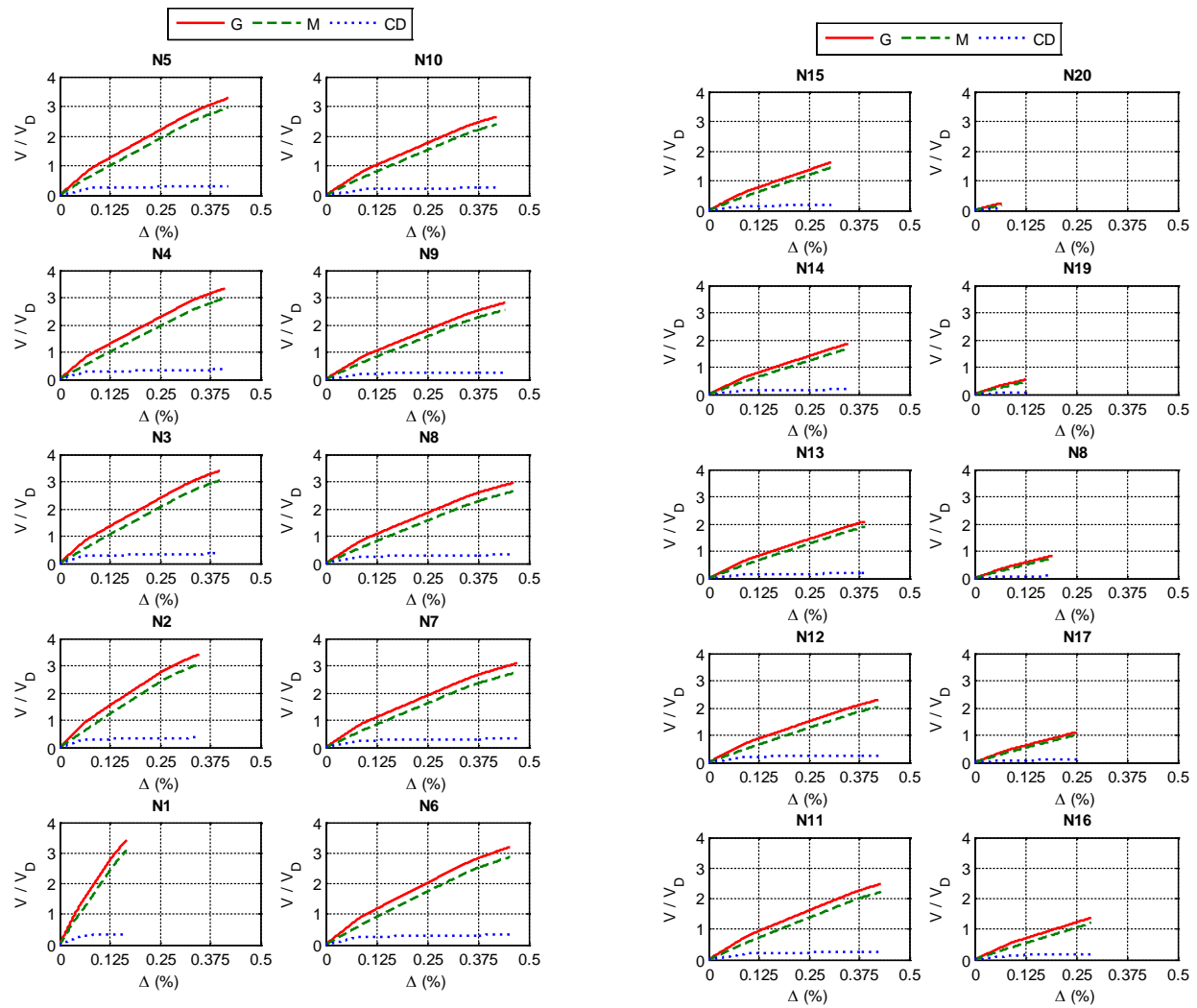


Figura A.185 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

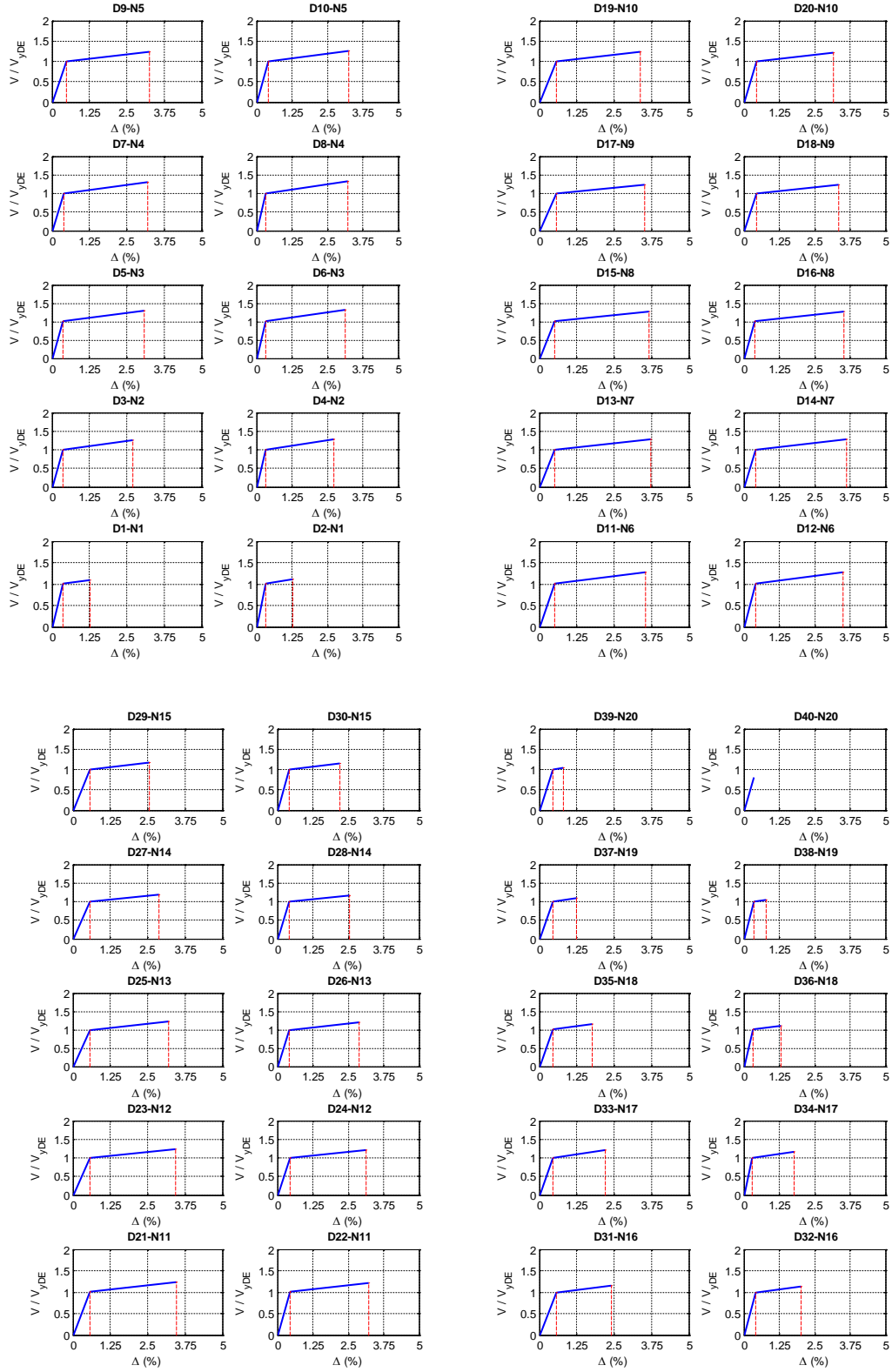


Figura A.186 $N = 20$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

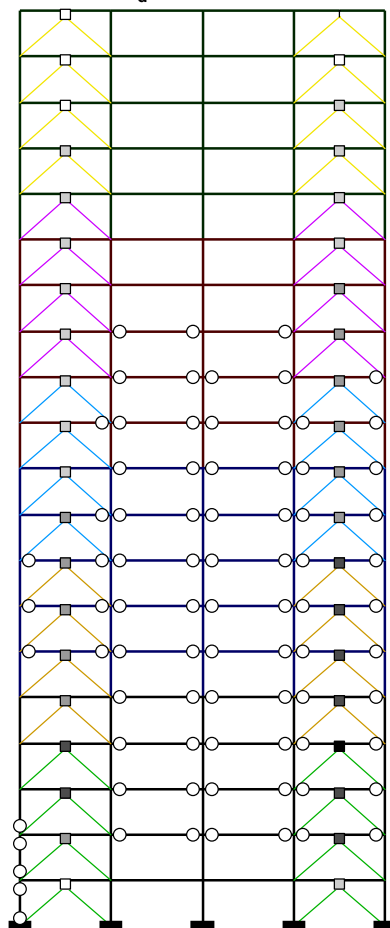
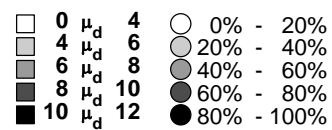
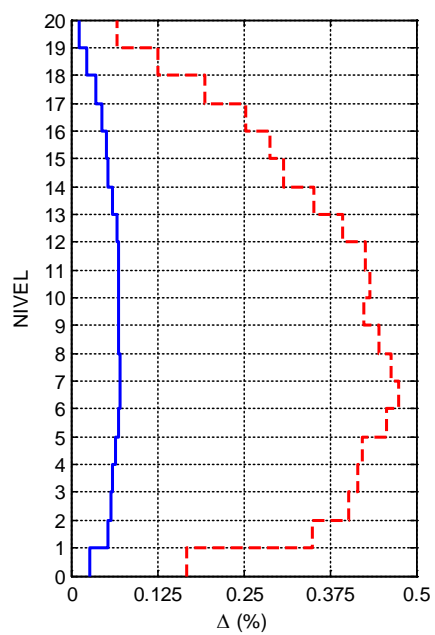
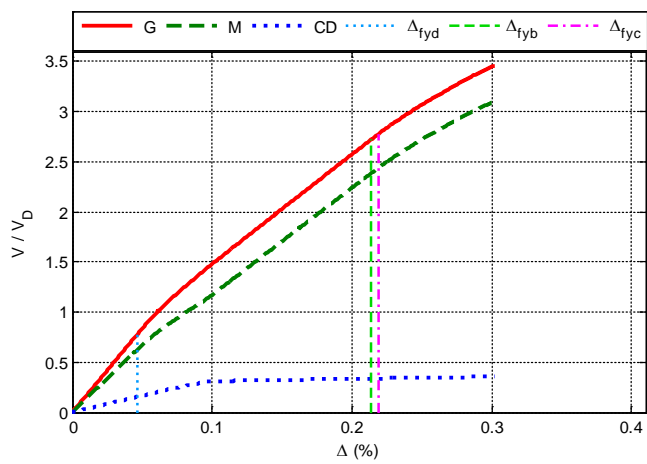


Figura A.187 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

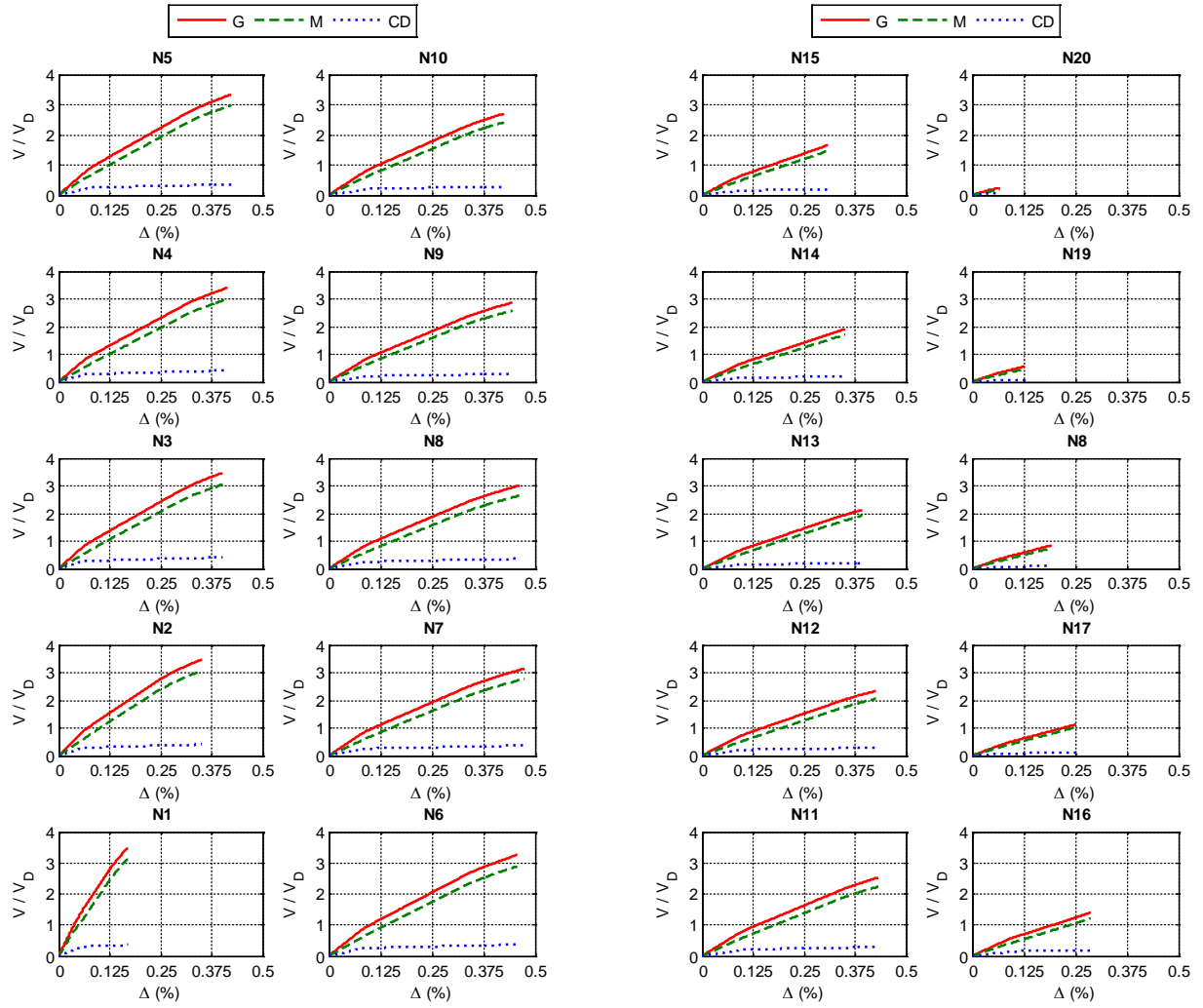


Figura A.188 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

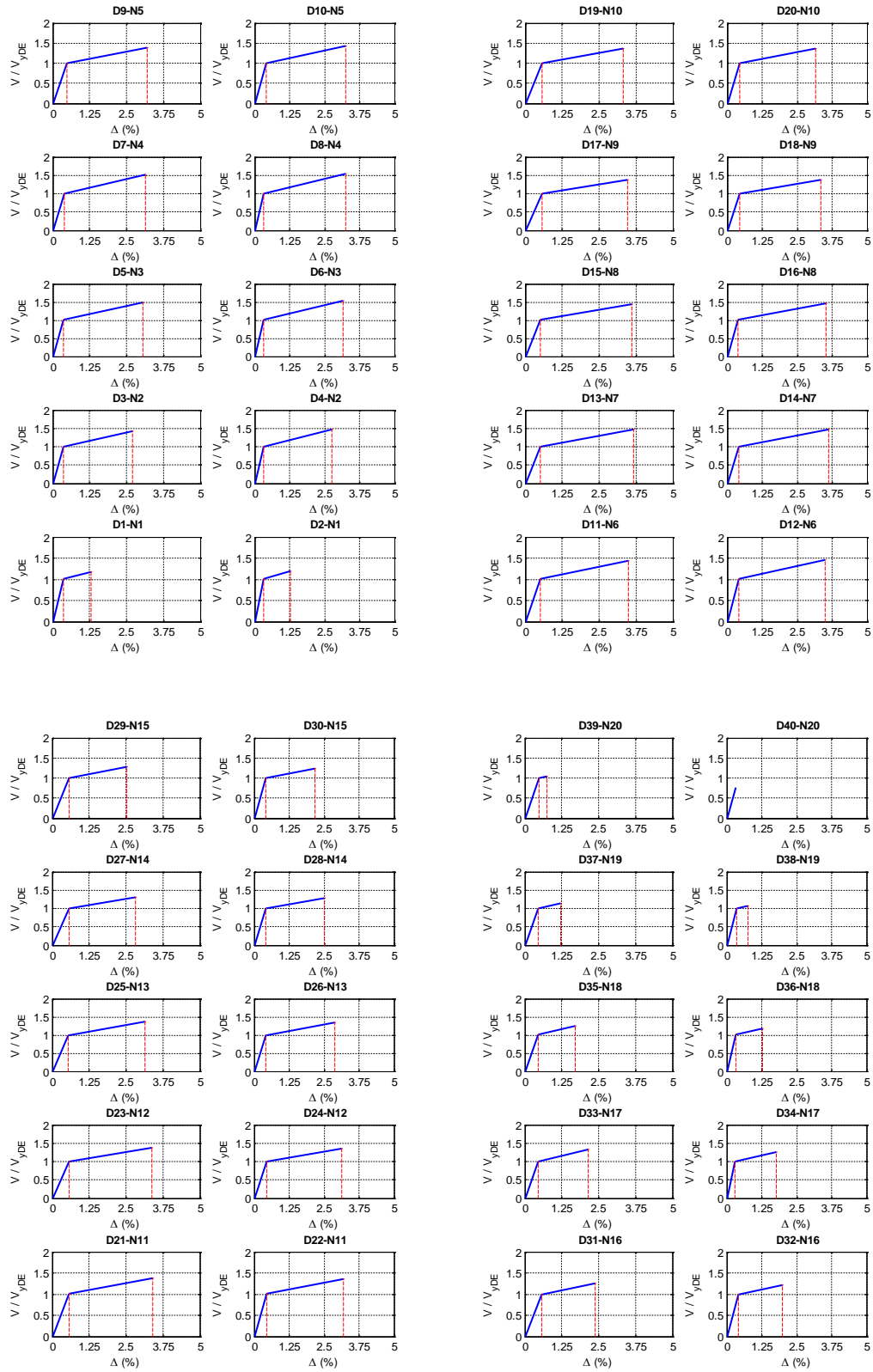


Figura A.189 $N = 20$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

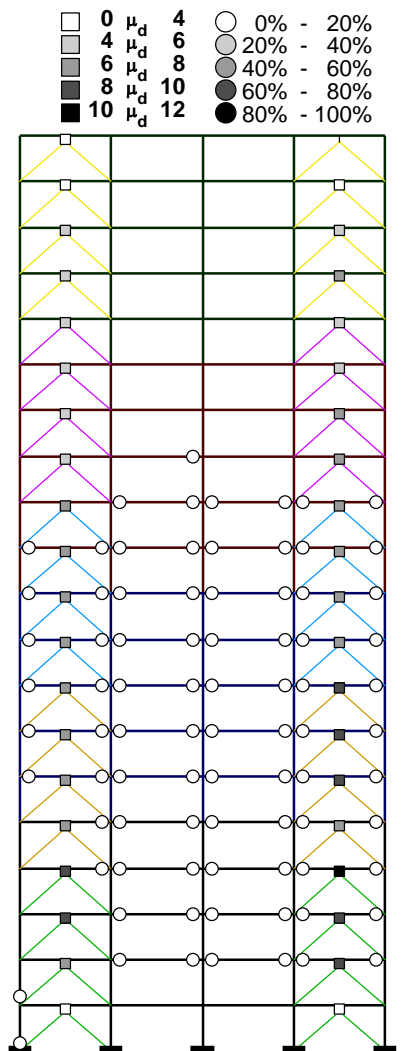
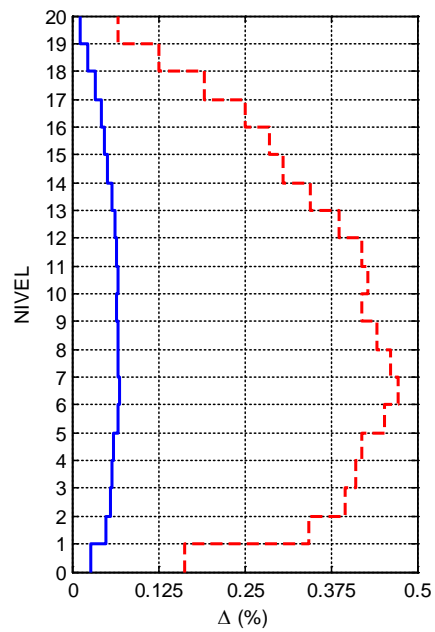
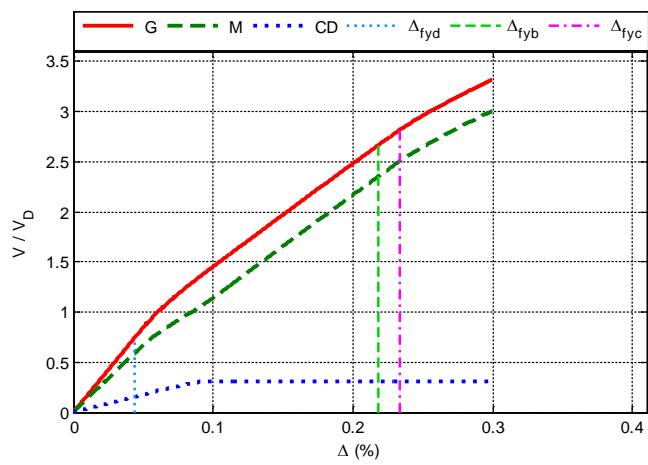


Figura A.190 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

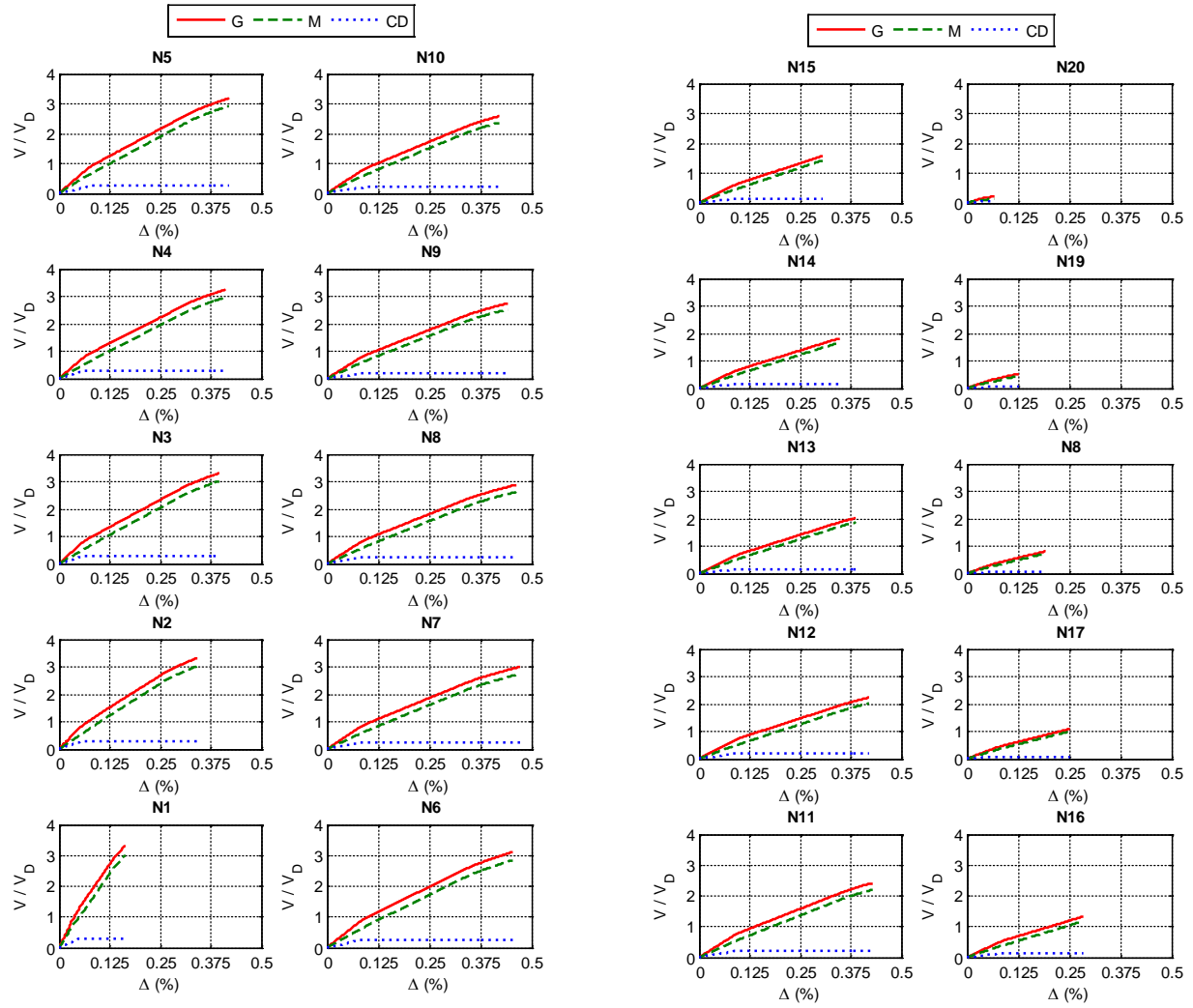


Figura A.191 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

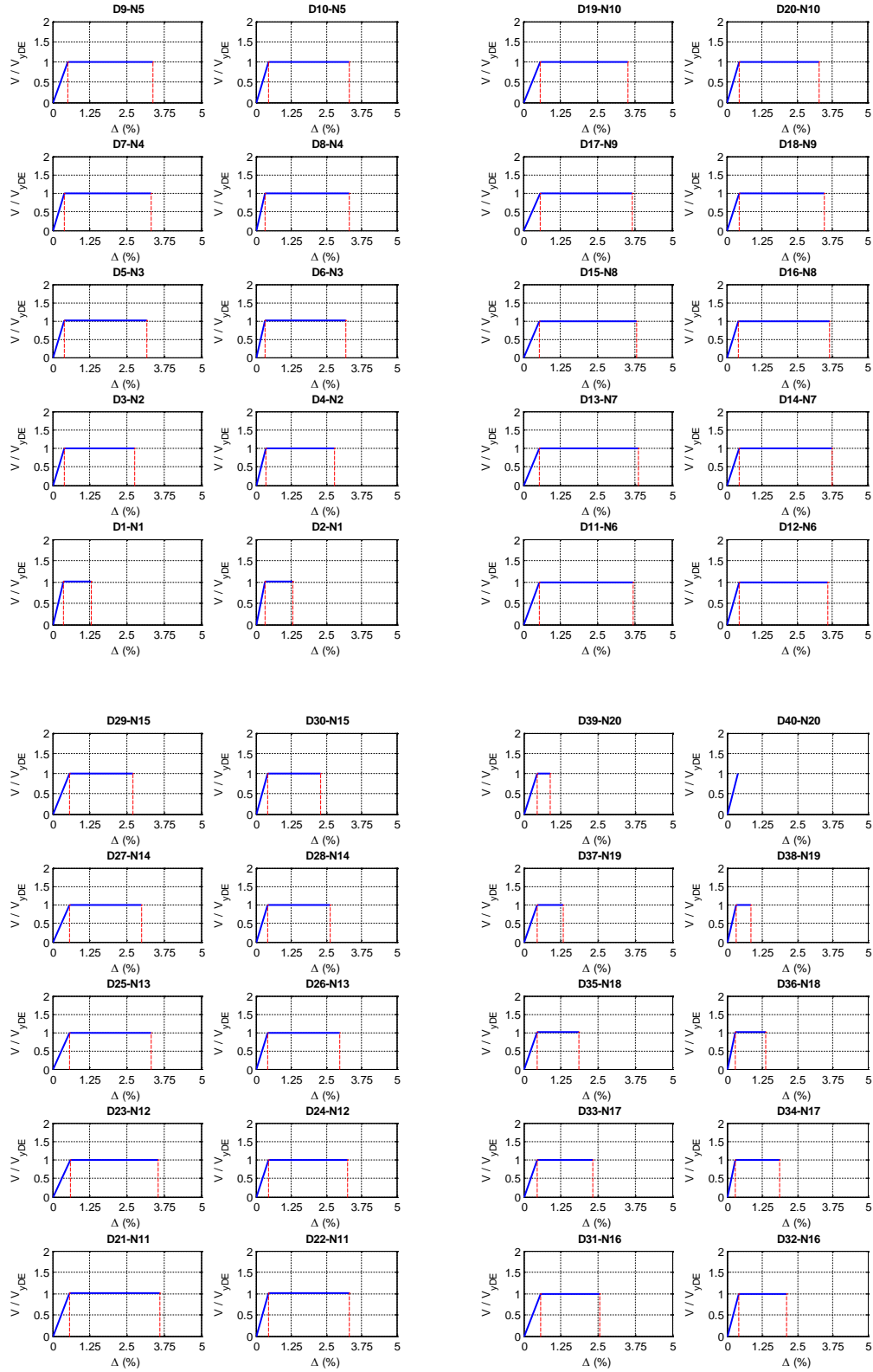


Figura A.192 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

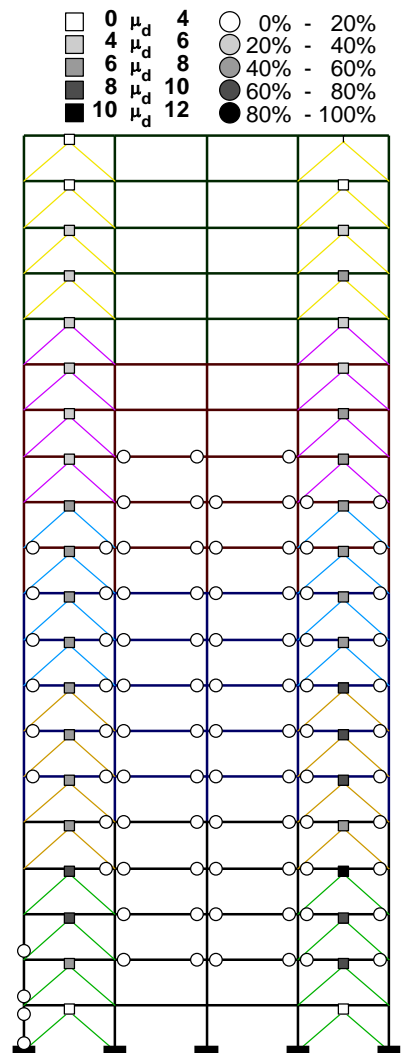
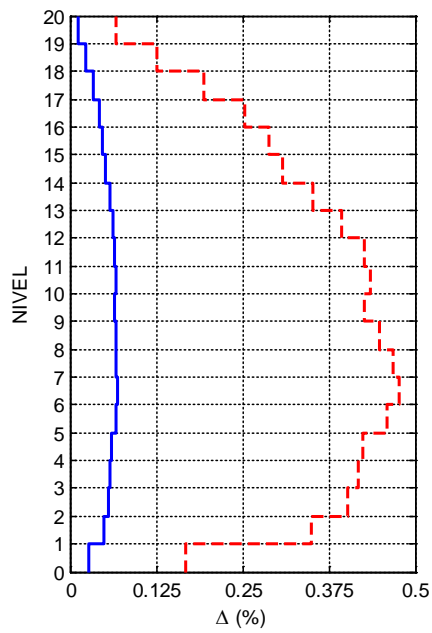
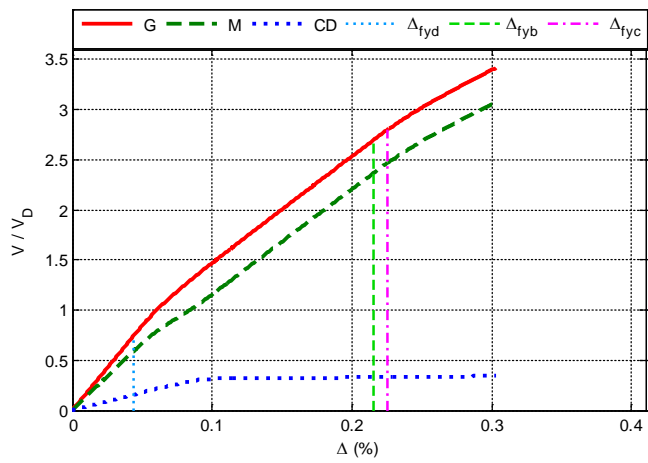


Figura A.193 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

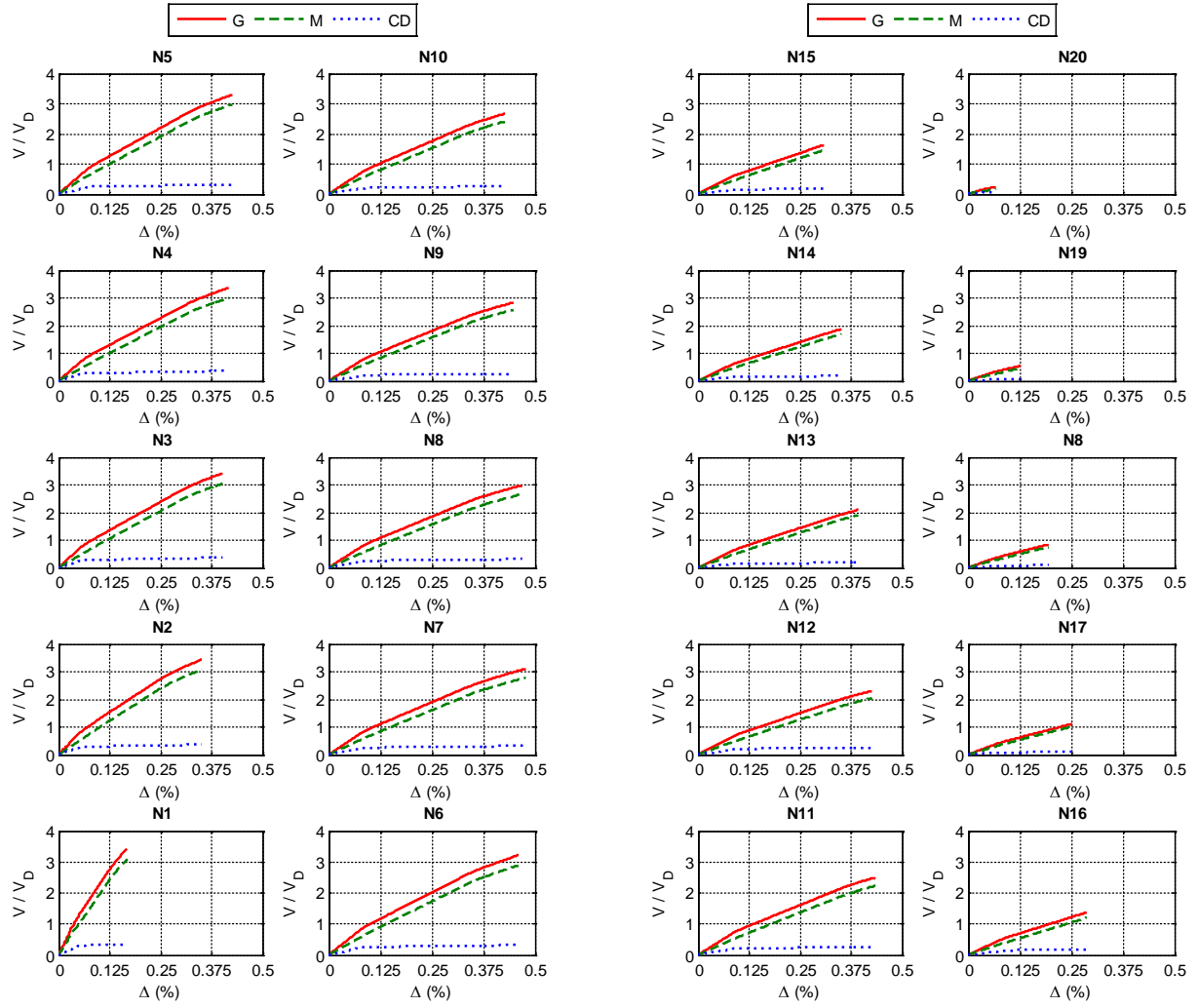


Figura A.194 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

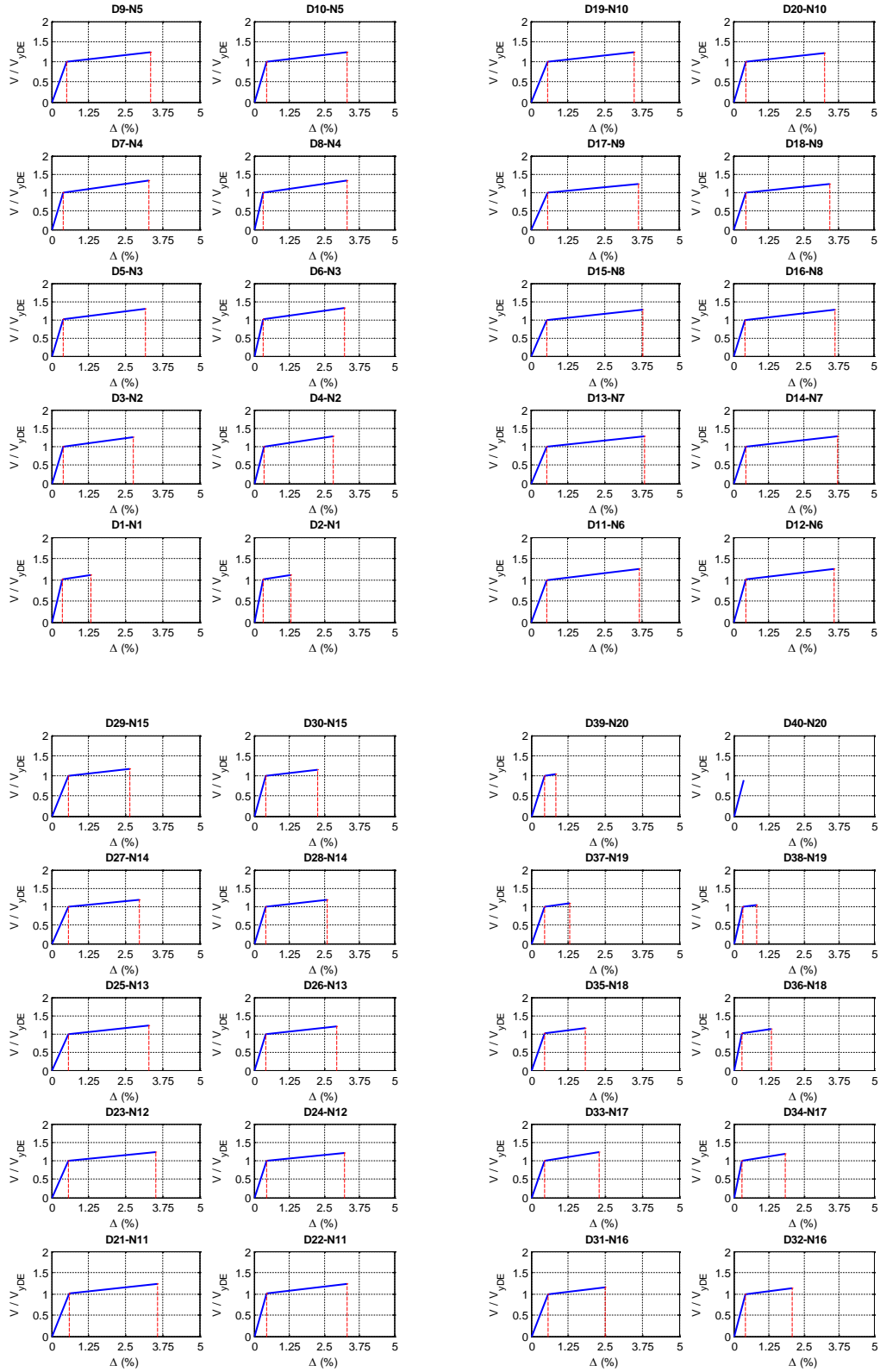


Figura A.195 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

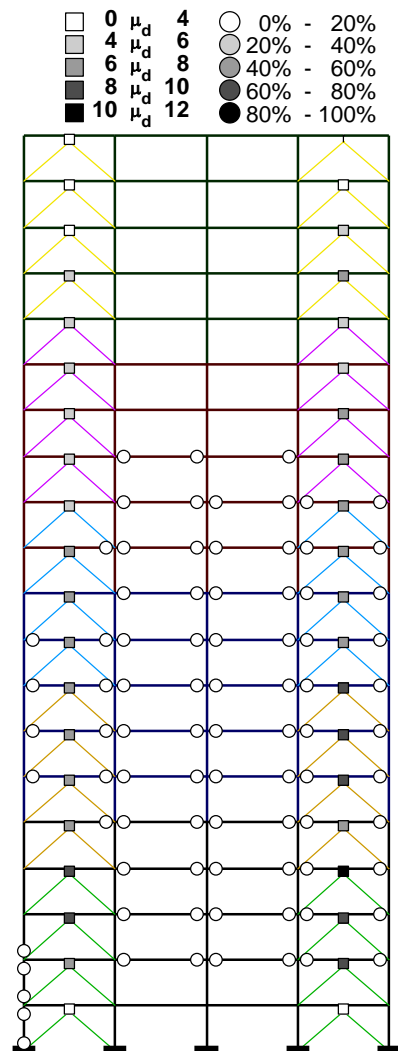
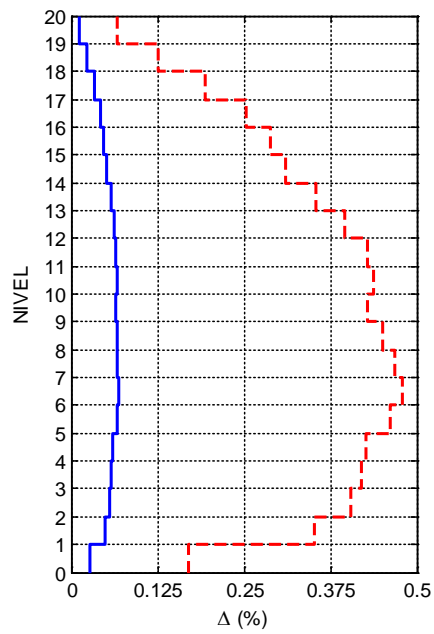
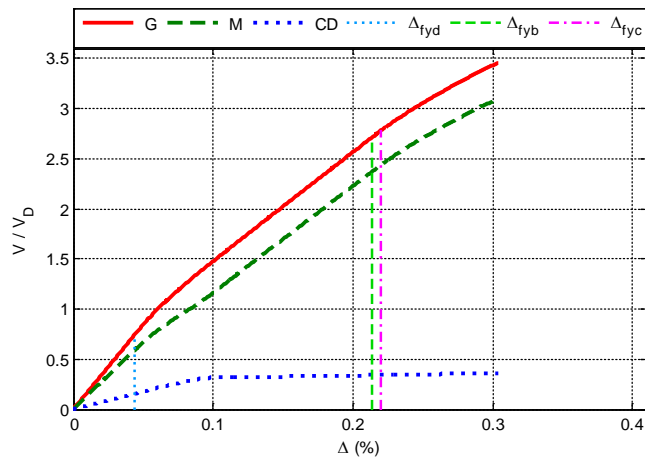


Figura A.196 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

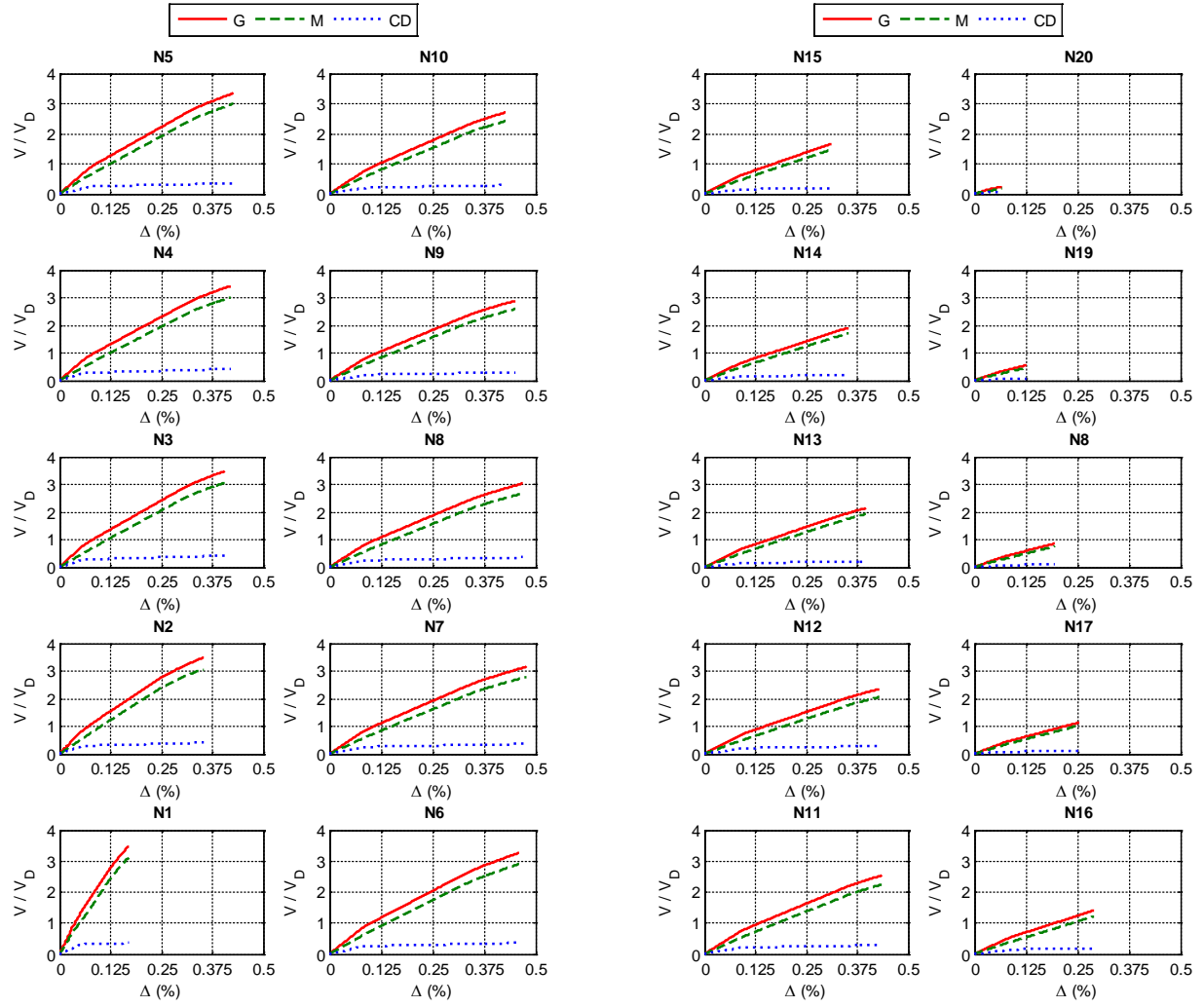


Figura A.197 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

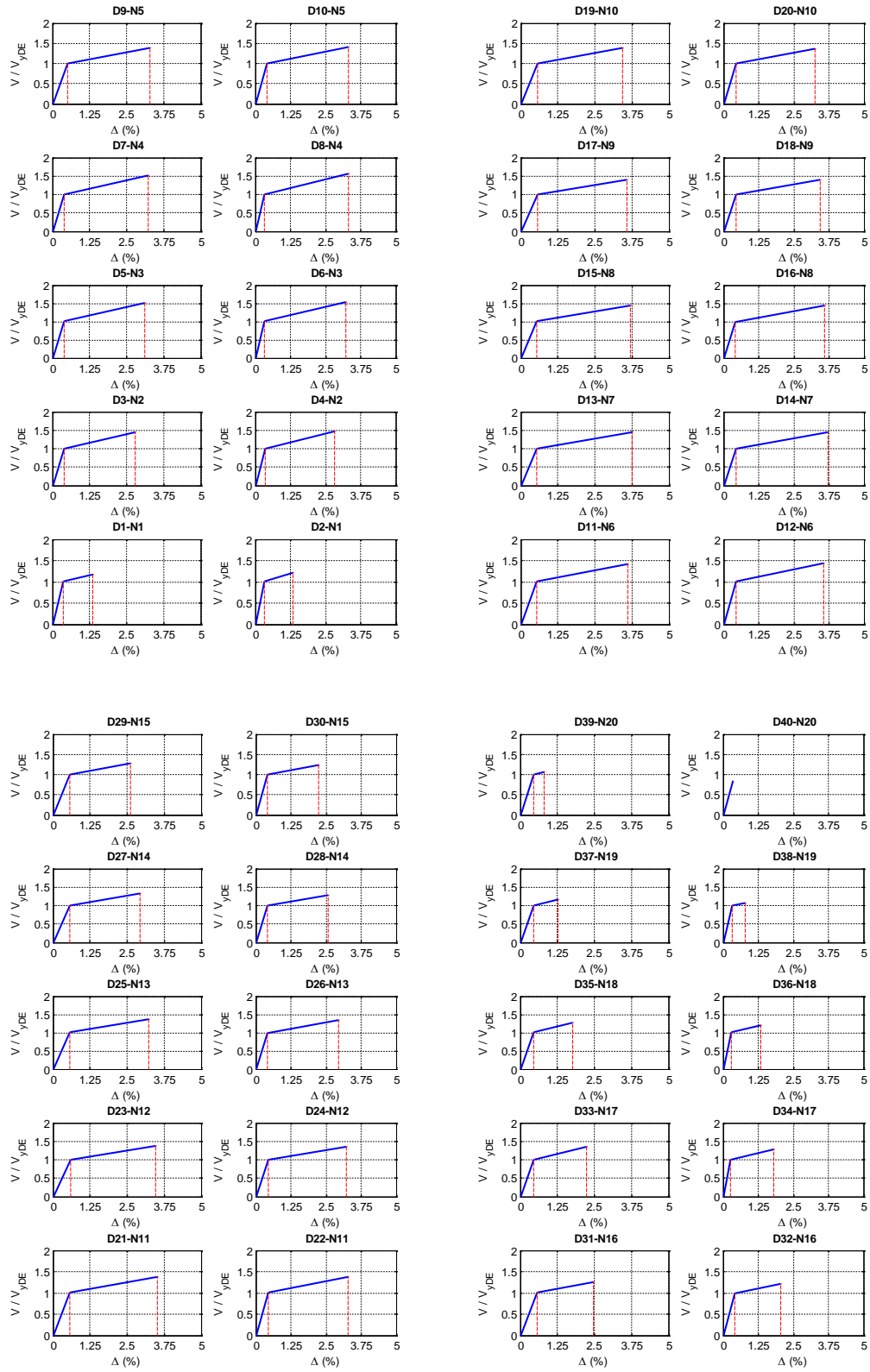


Figura A.198 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

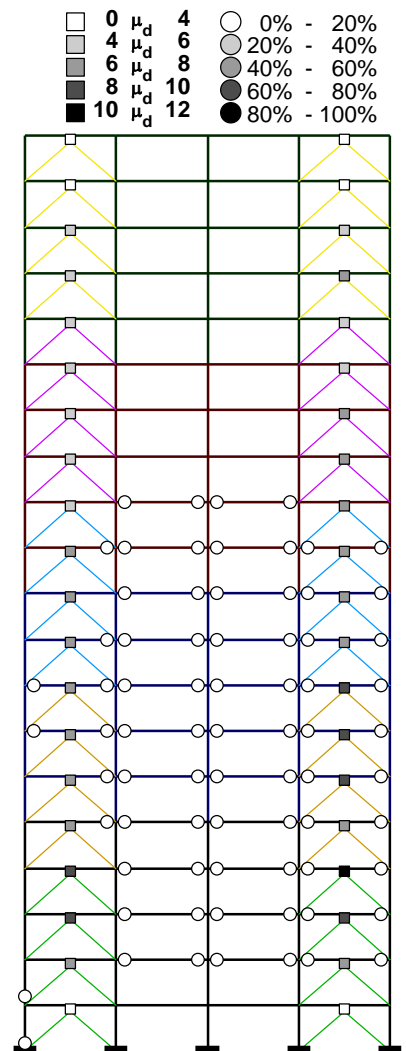
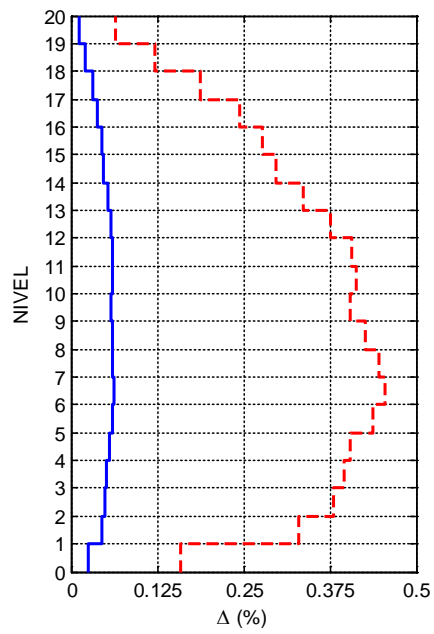
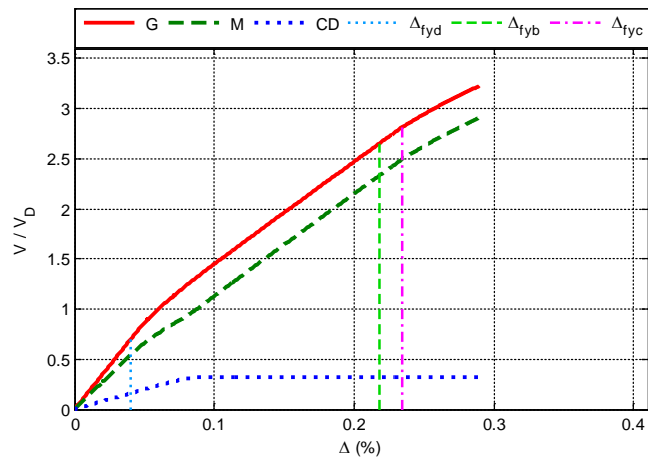


Figura A.199 $N = 20$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

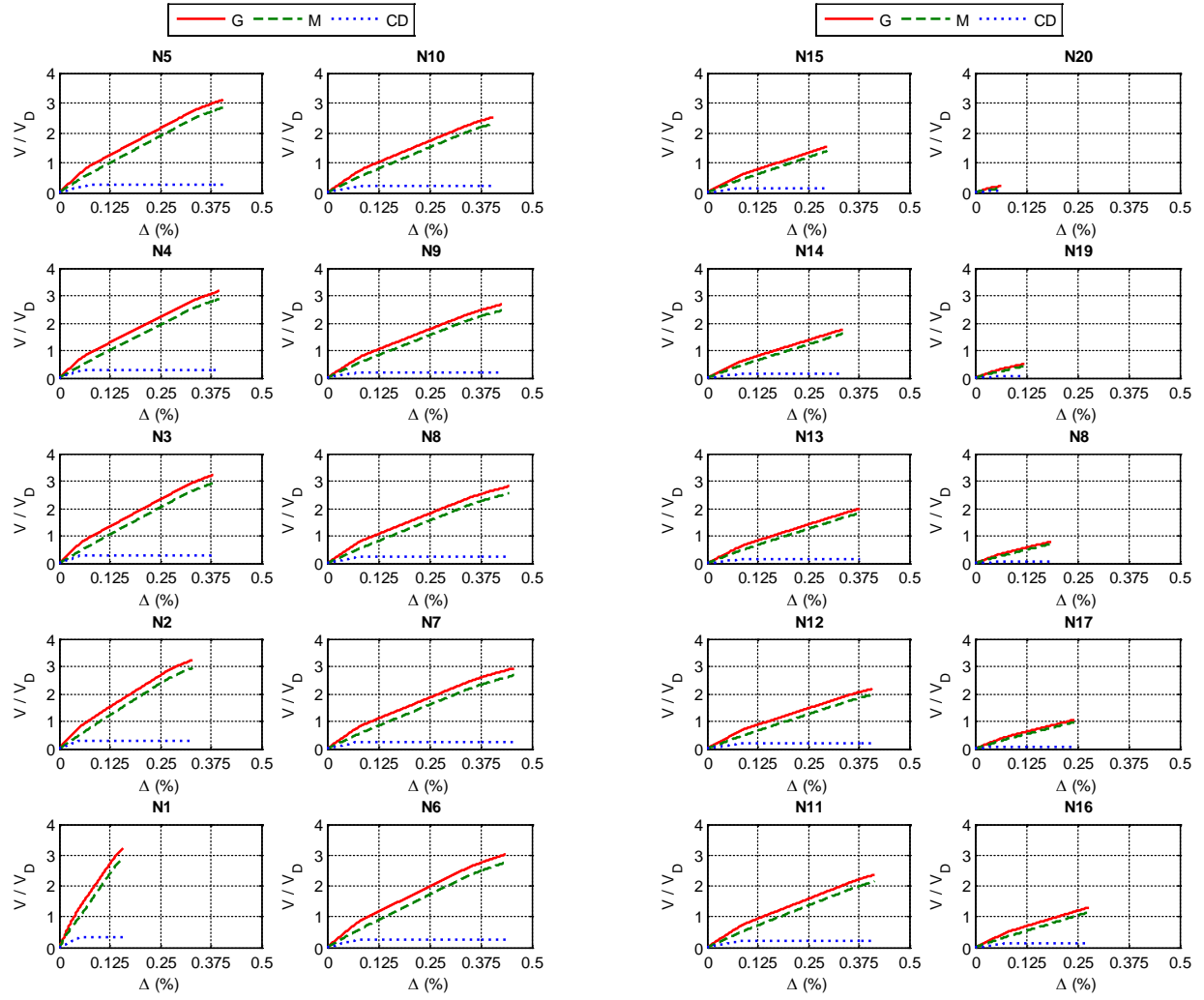


Figura A.200 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

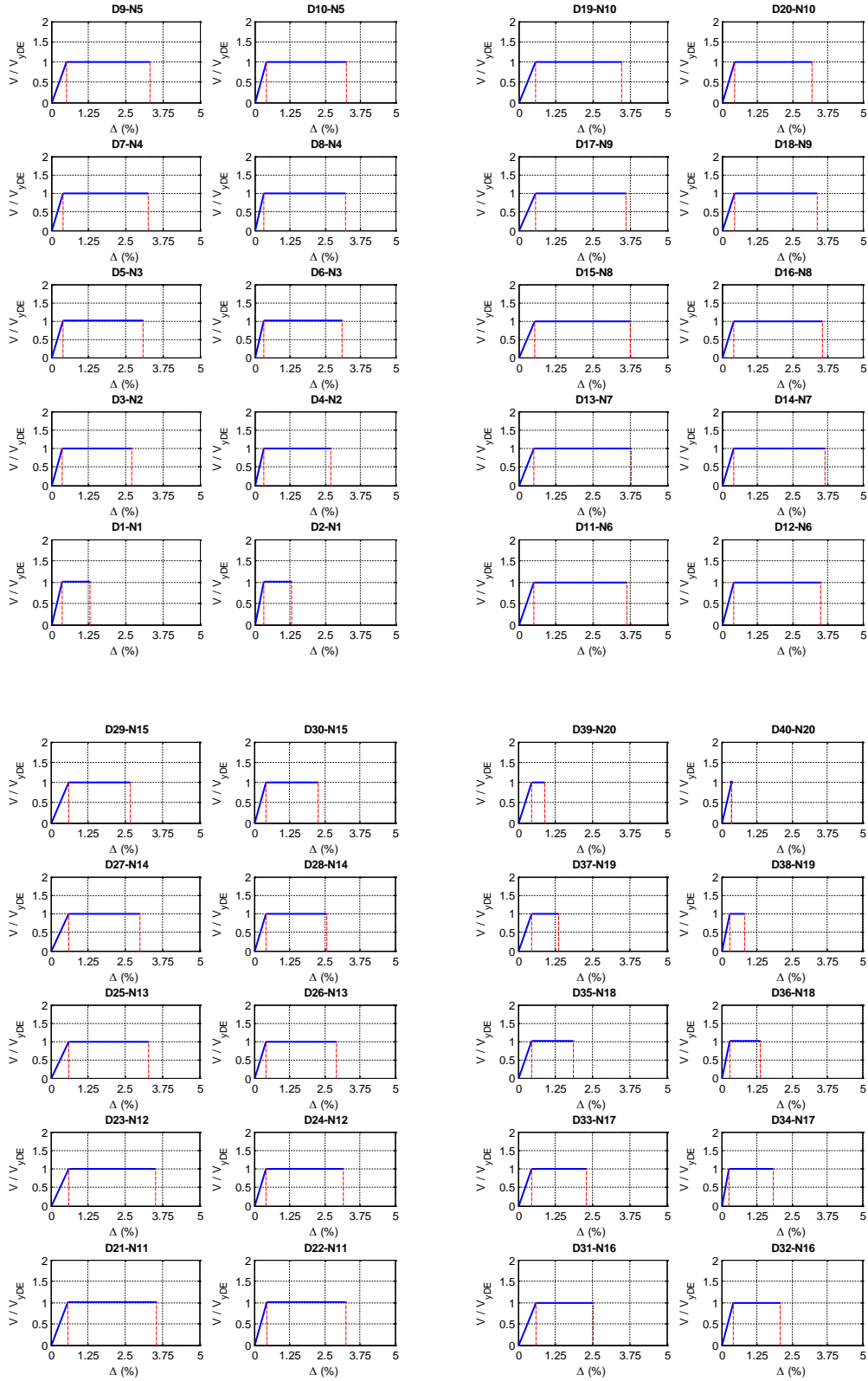


Figura A.201 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

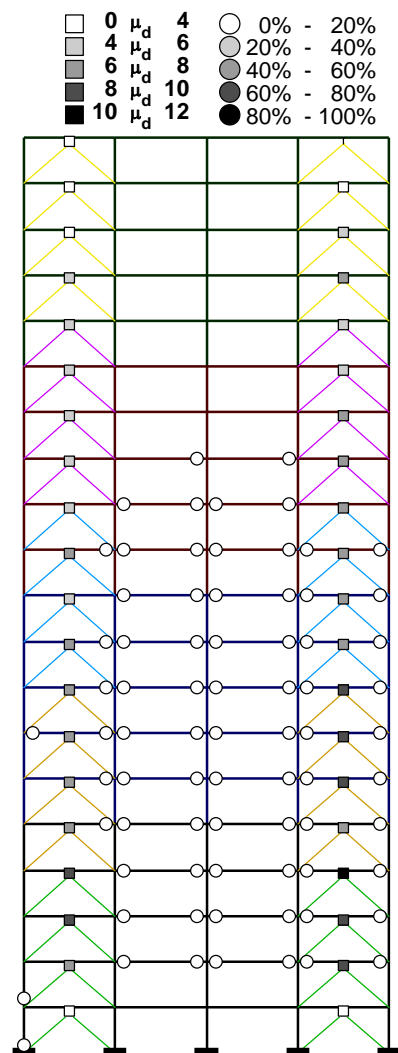
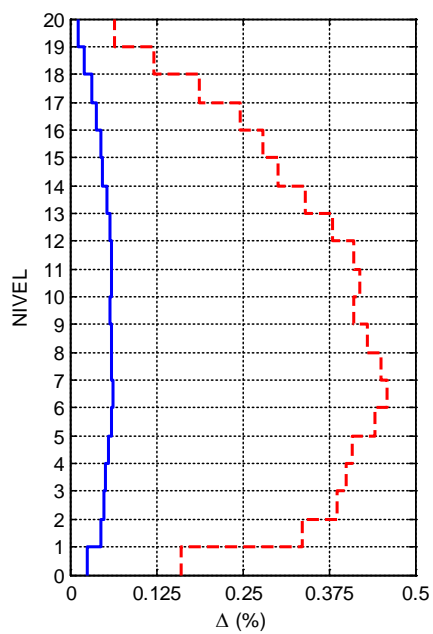
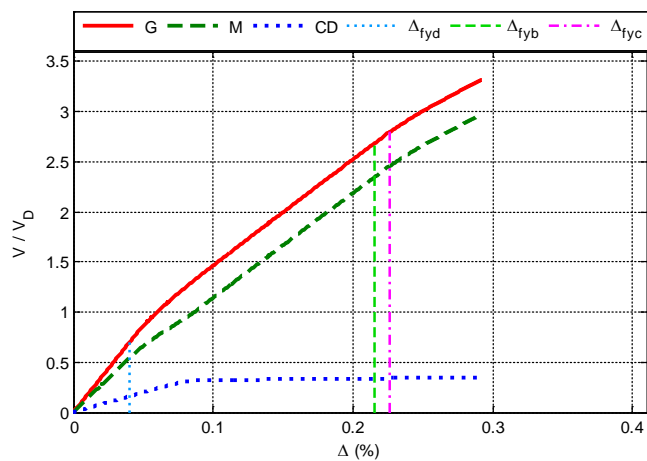


Figura A.202 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

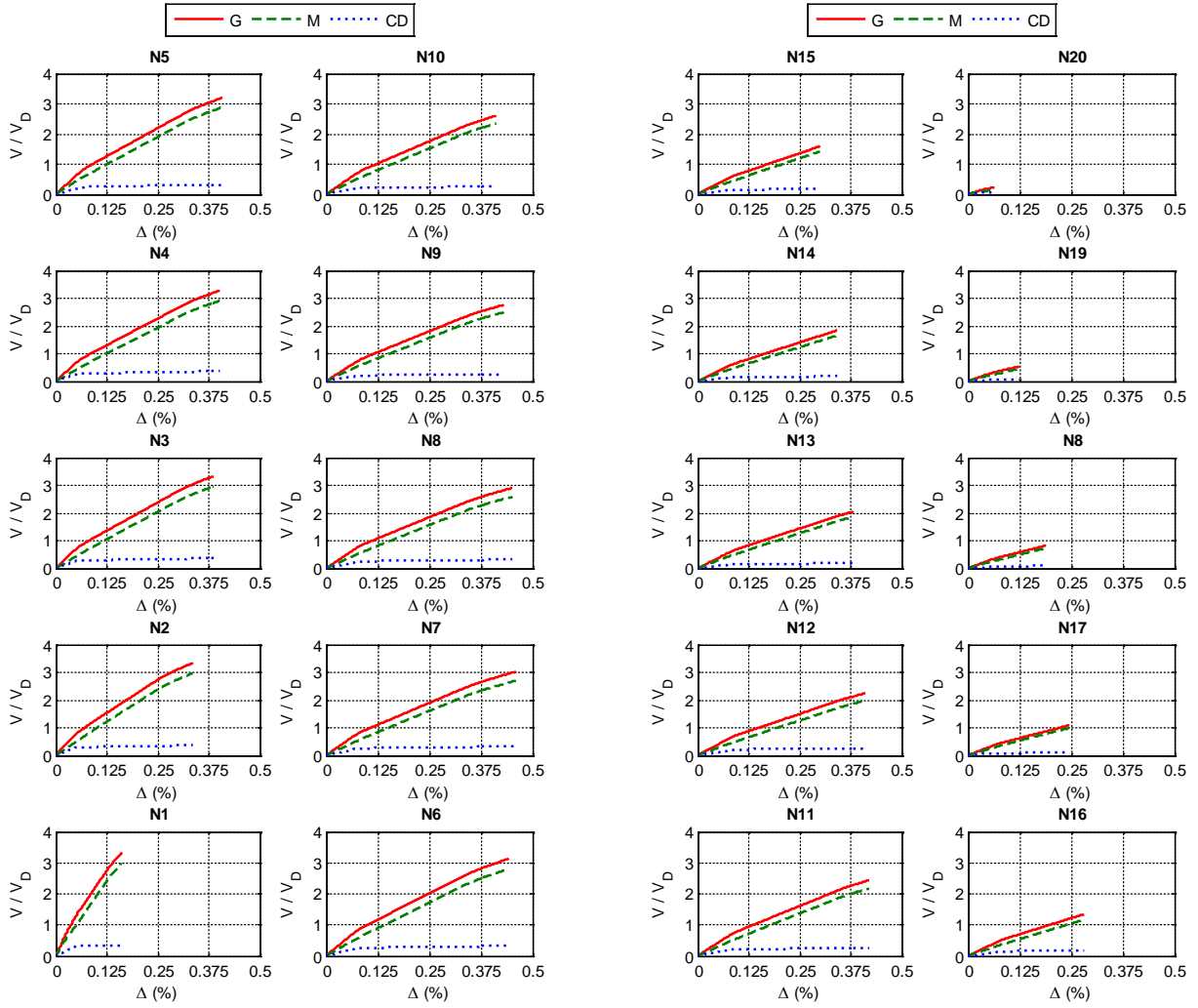


Figura A.203 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

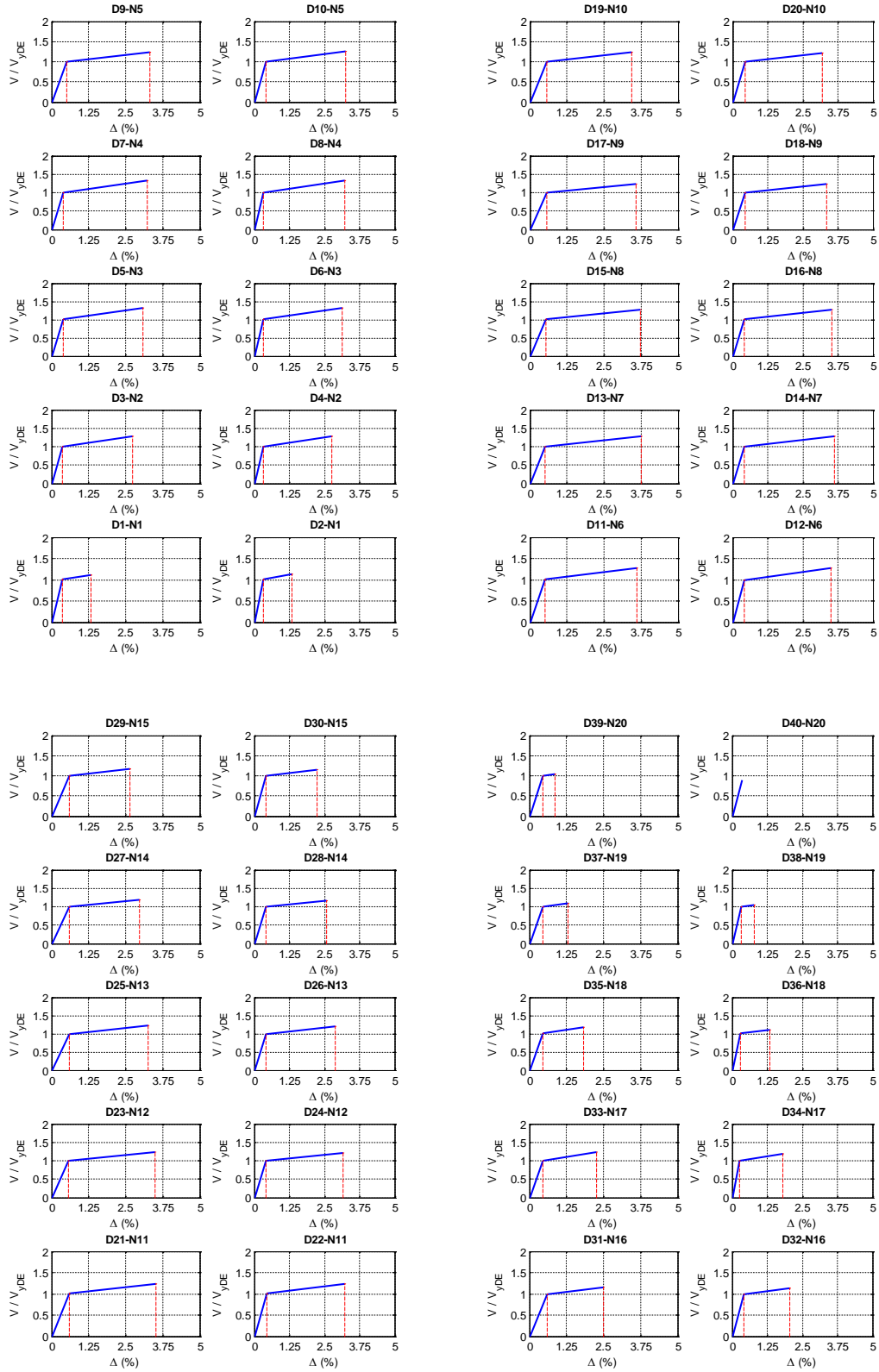


Figura A.204 $N = 20$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

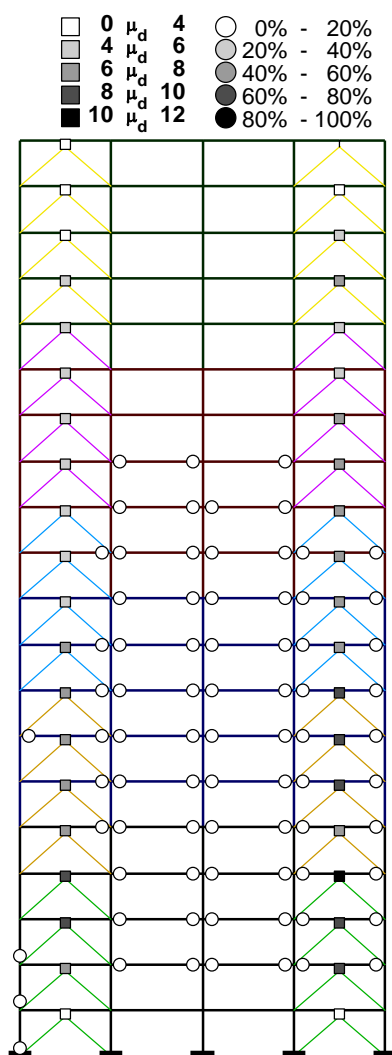
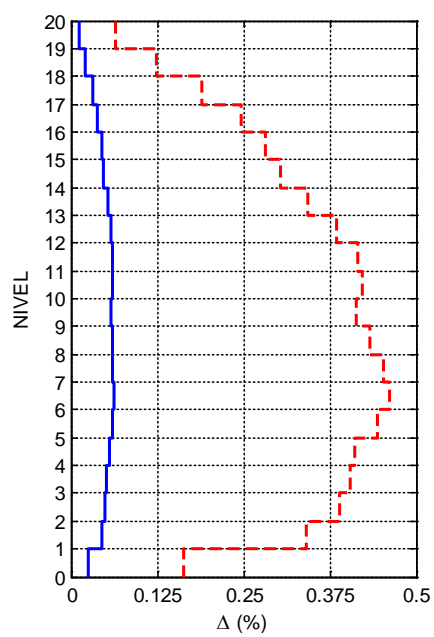
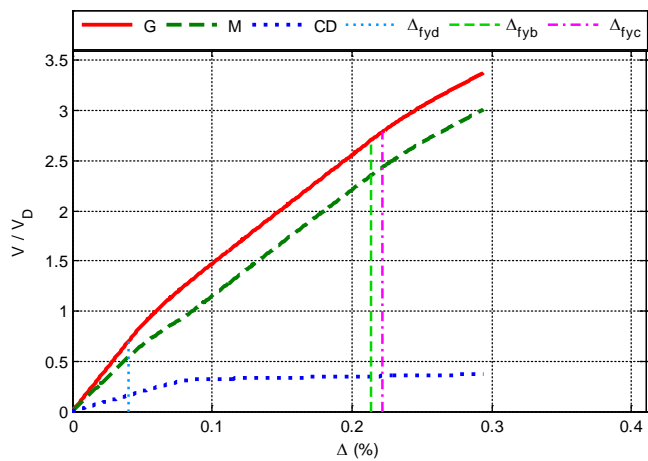


Figura A.205 $N = 20$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

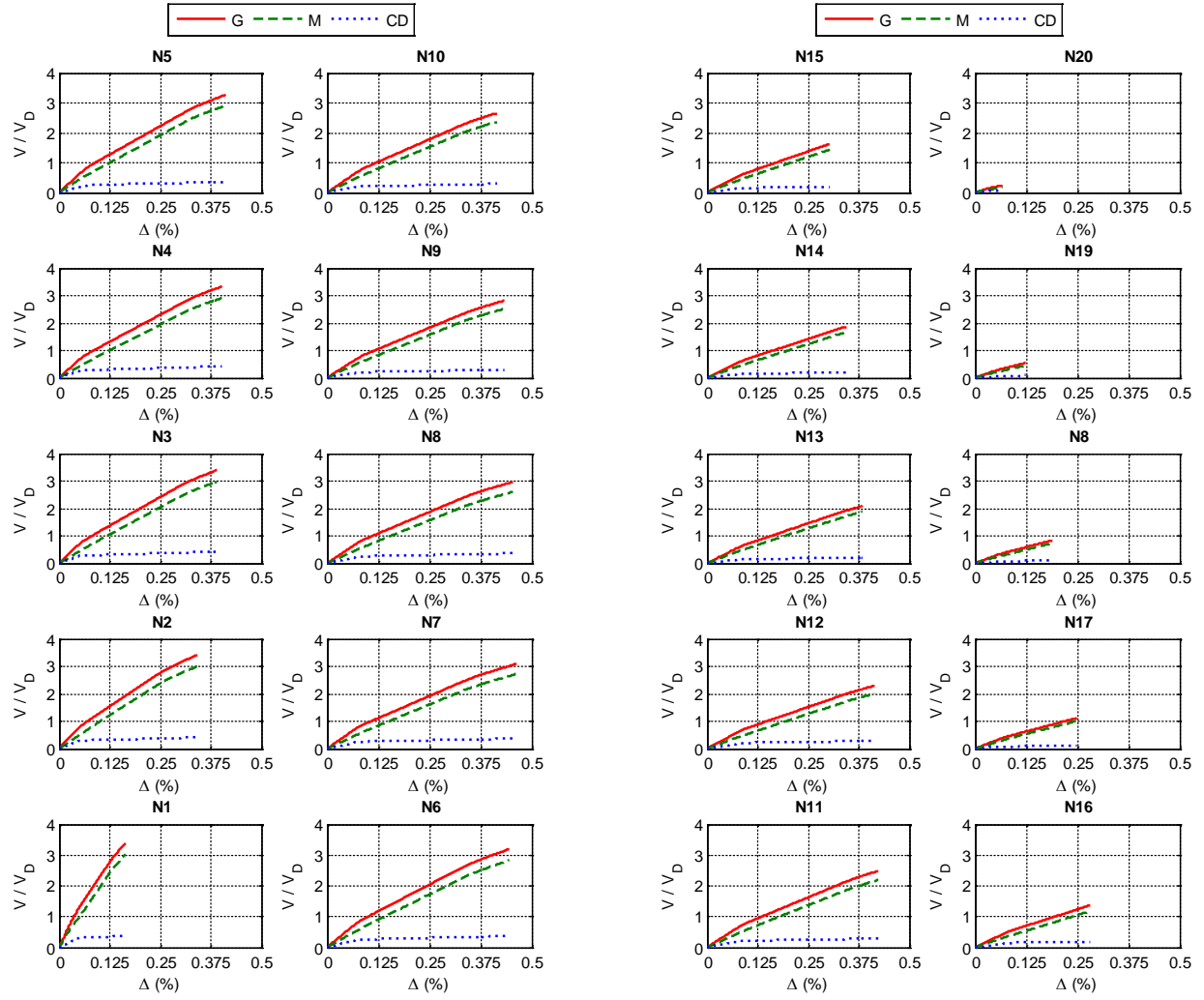


Figura A.206 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

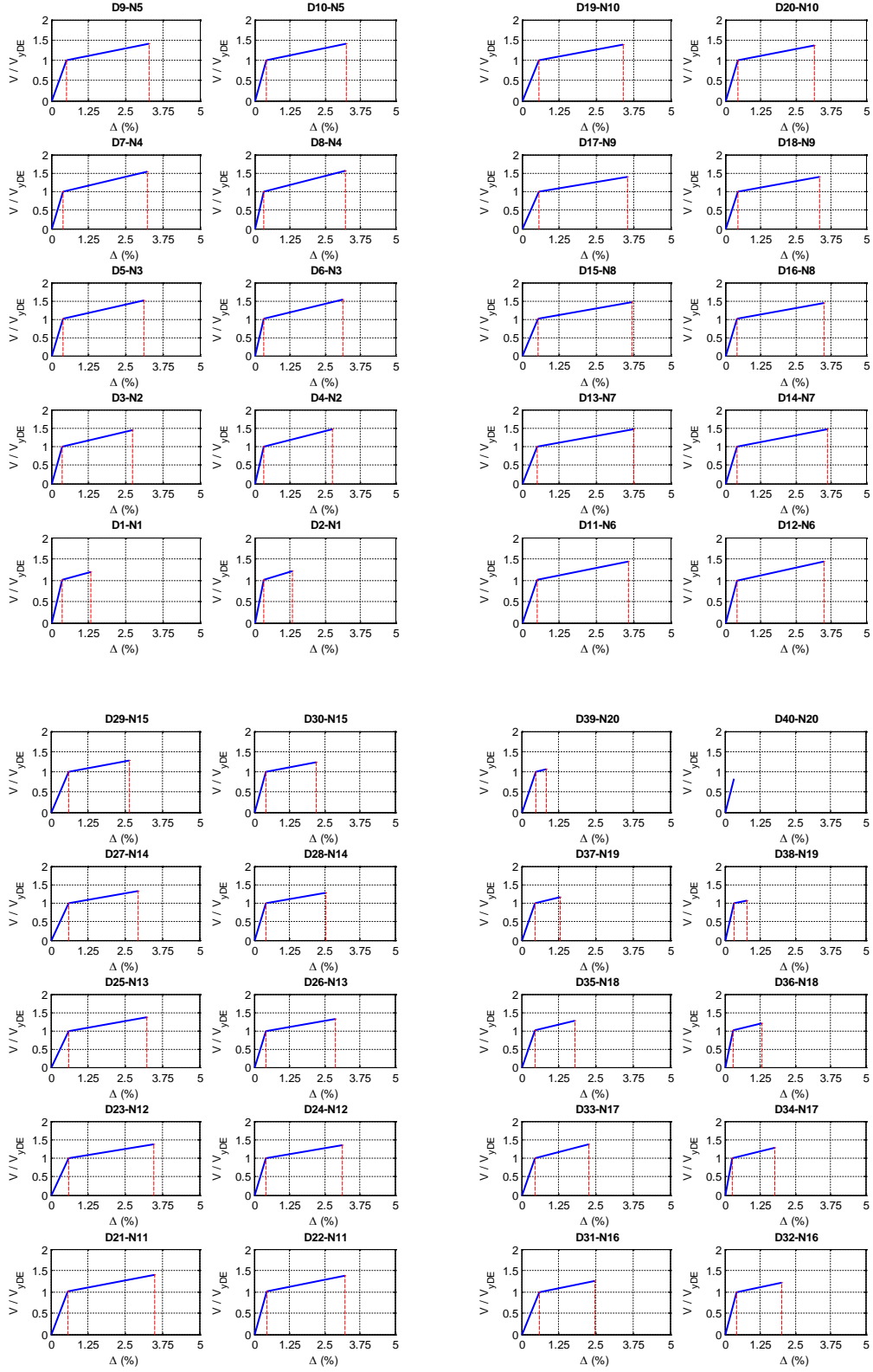


Figura A.207 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

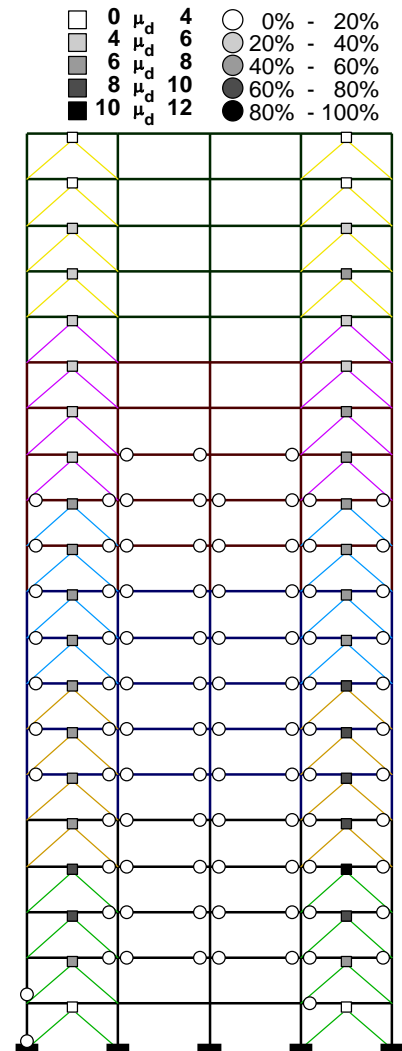
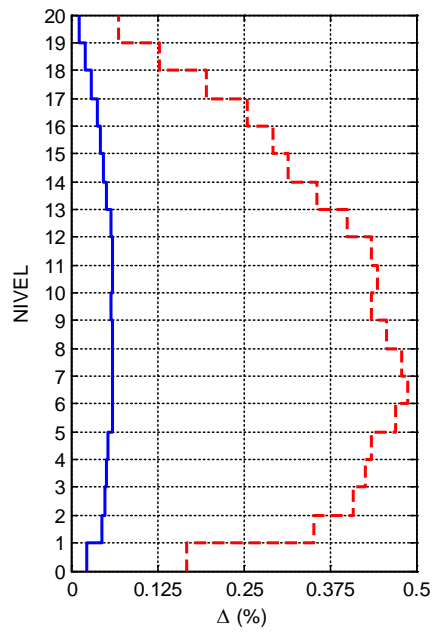
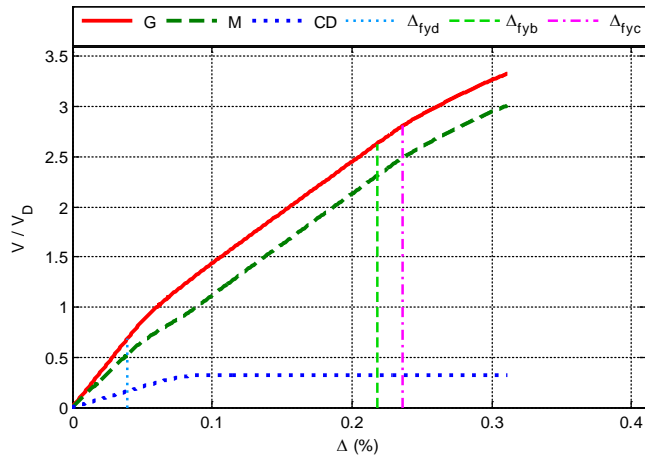


Figura A.208 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

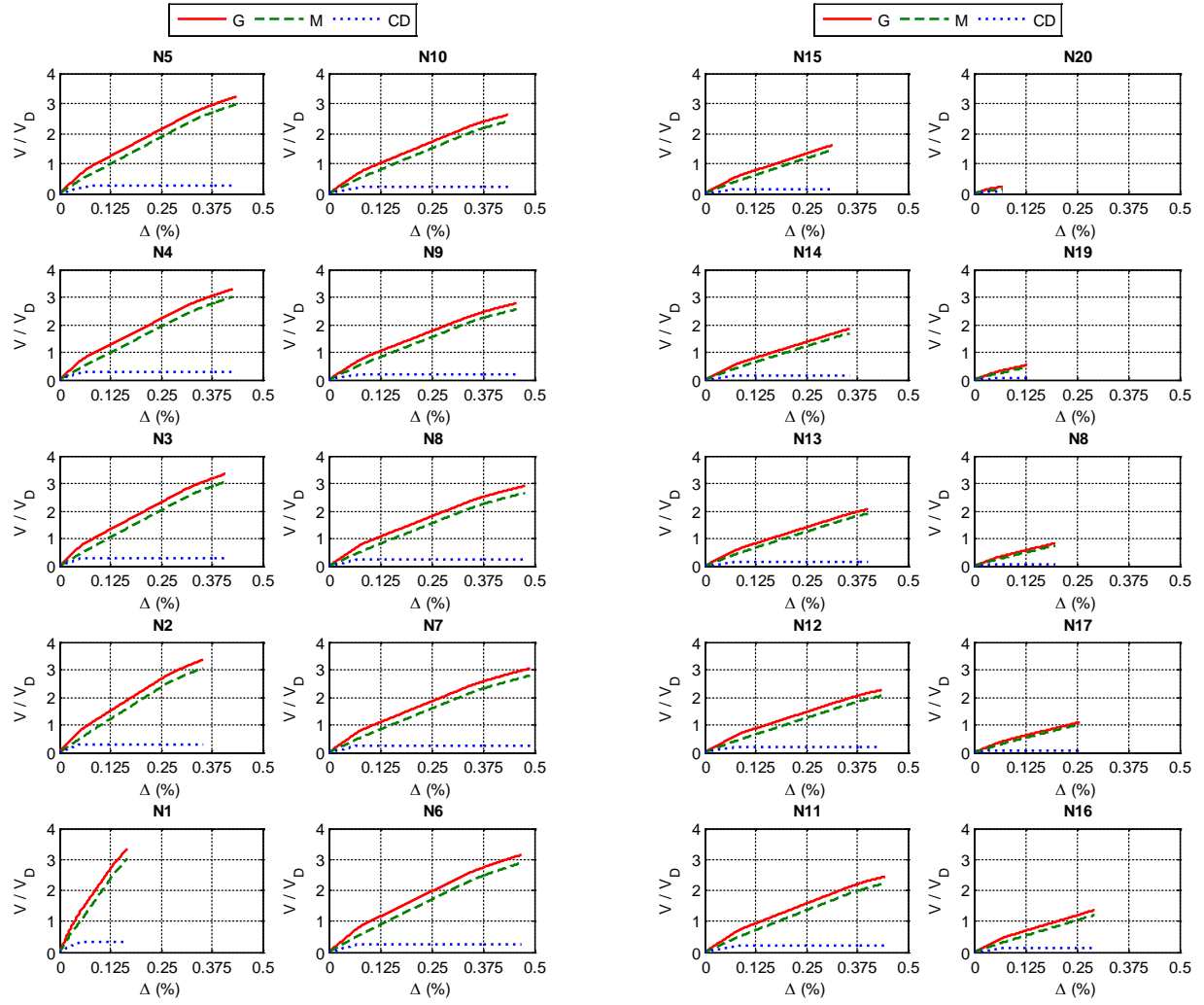


Figura A.209 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

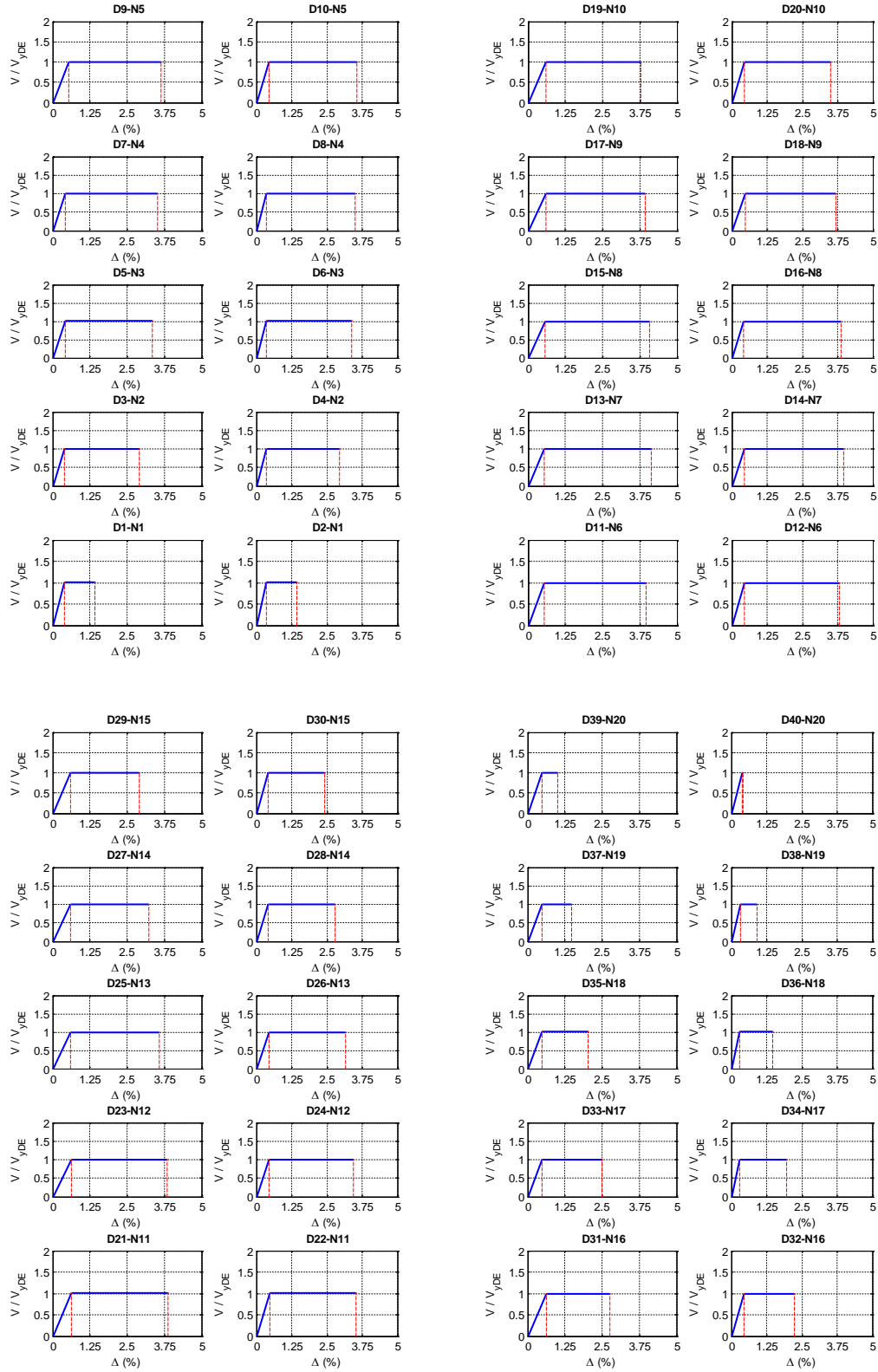


Figura A.210 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

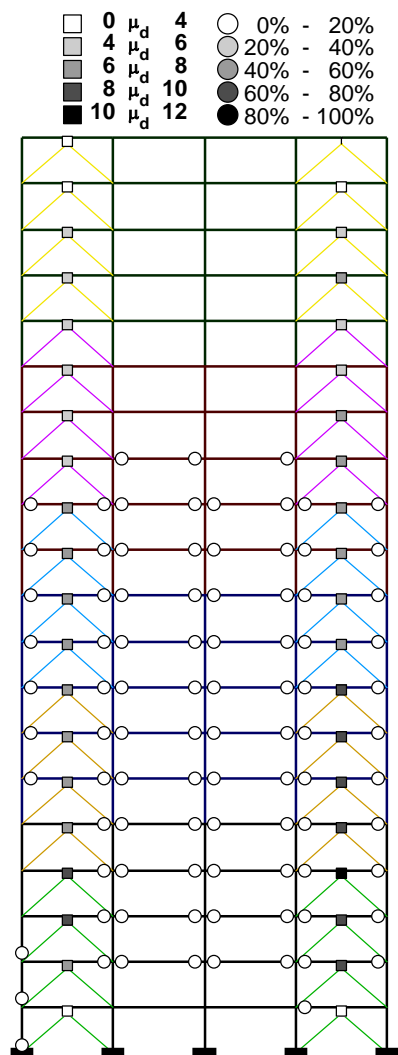
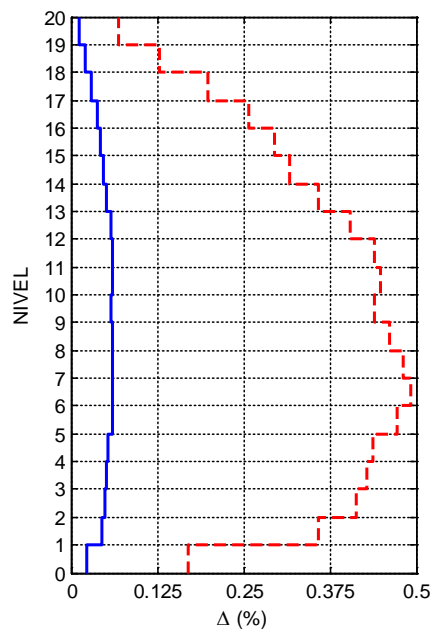
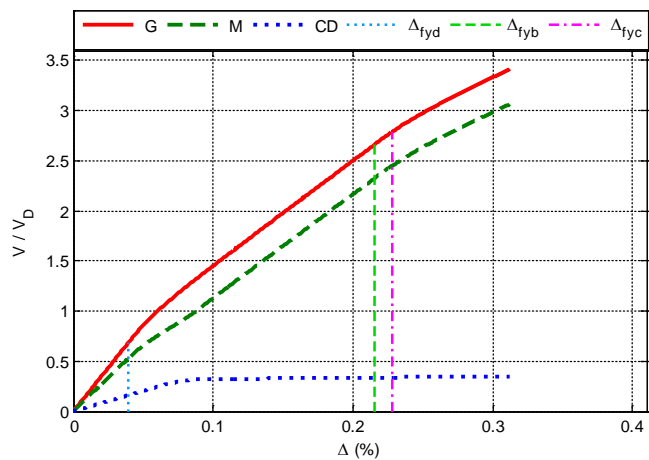


Figura A.211 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

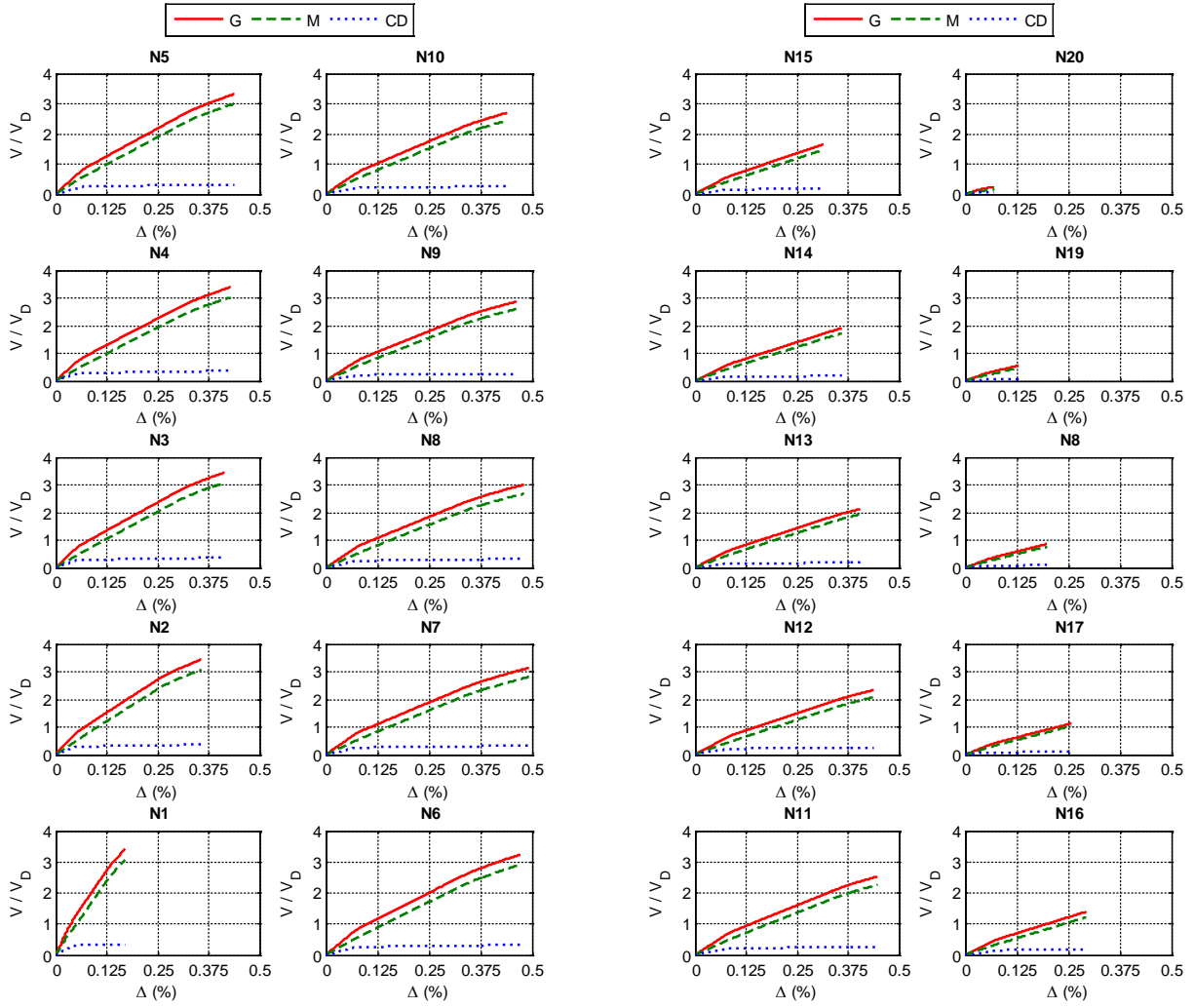


Figura A.212 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

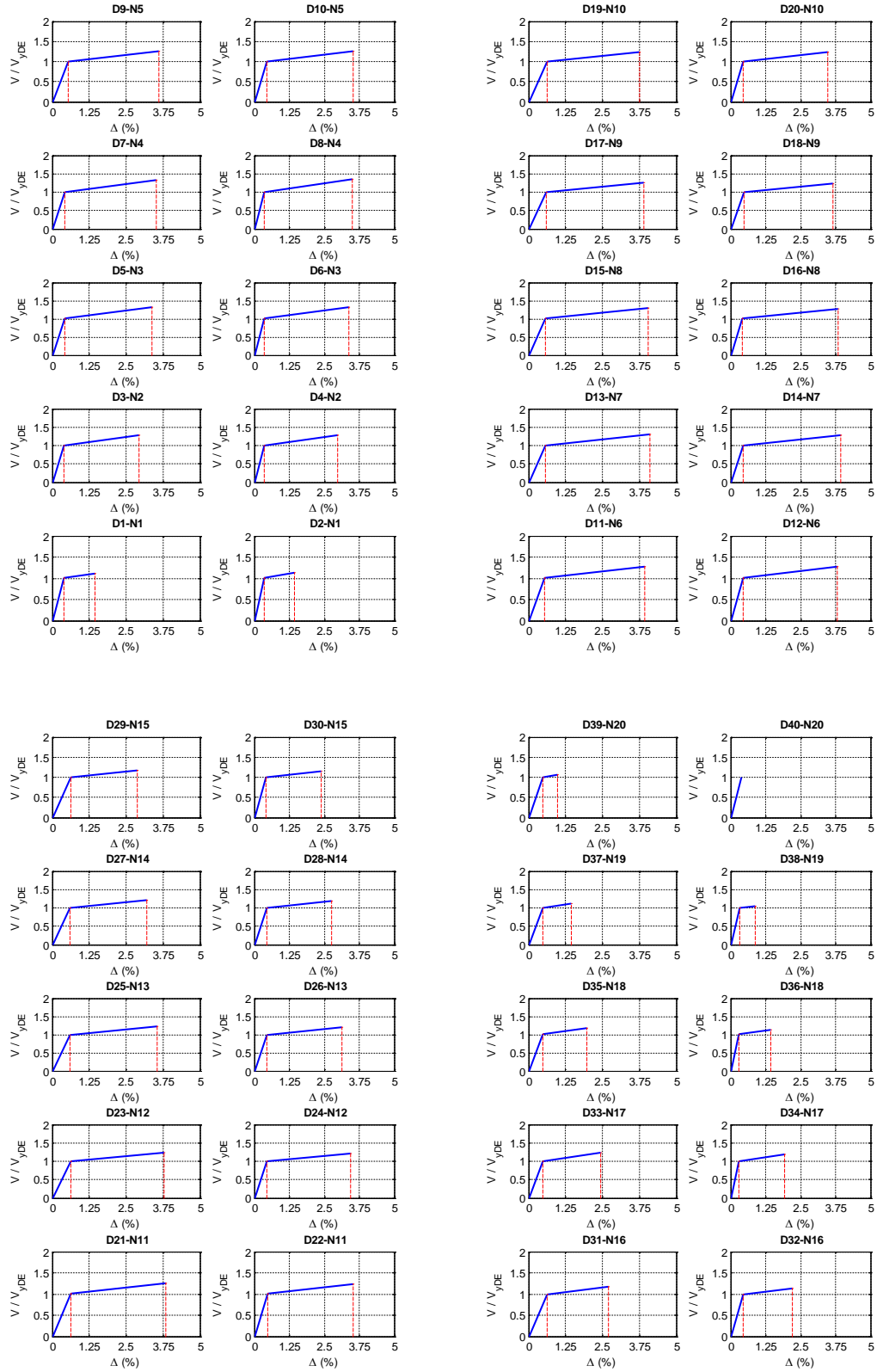


Figura A.213 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

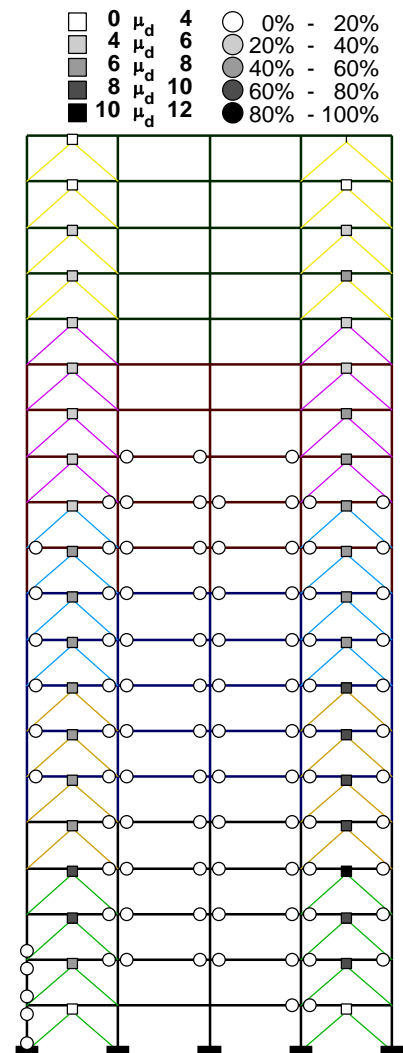
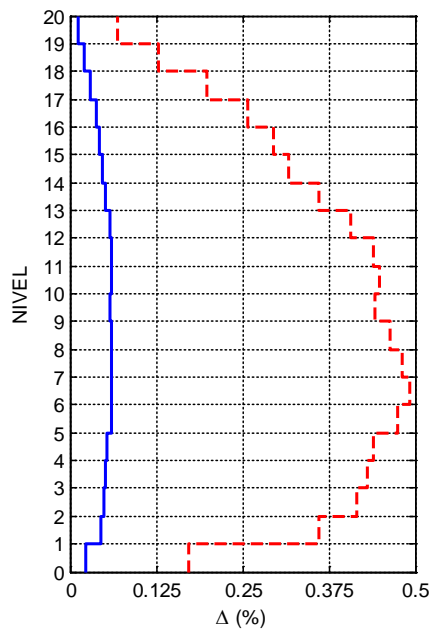
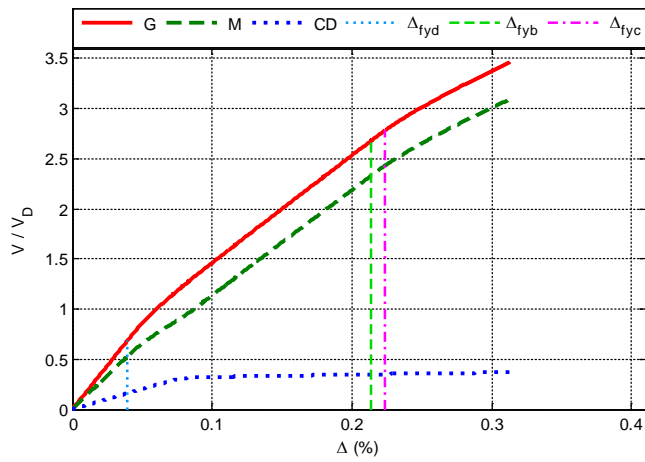


Figura A.214 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

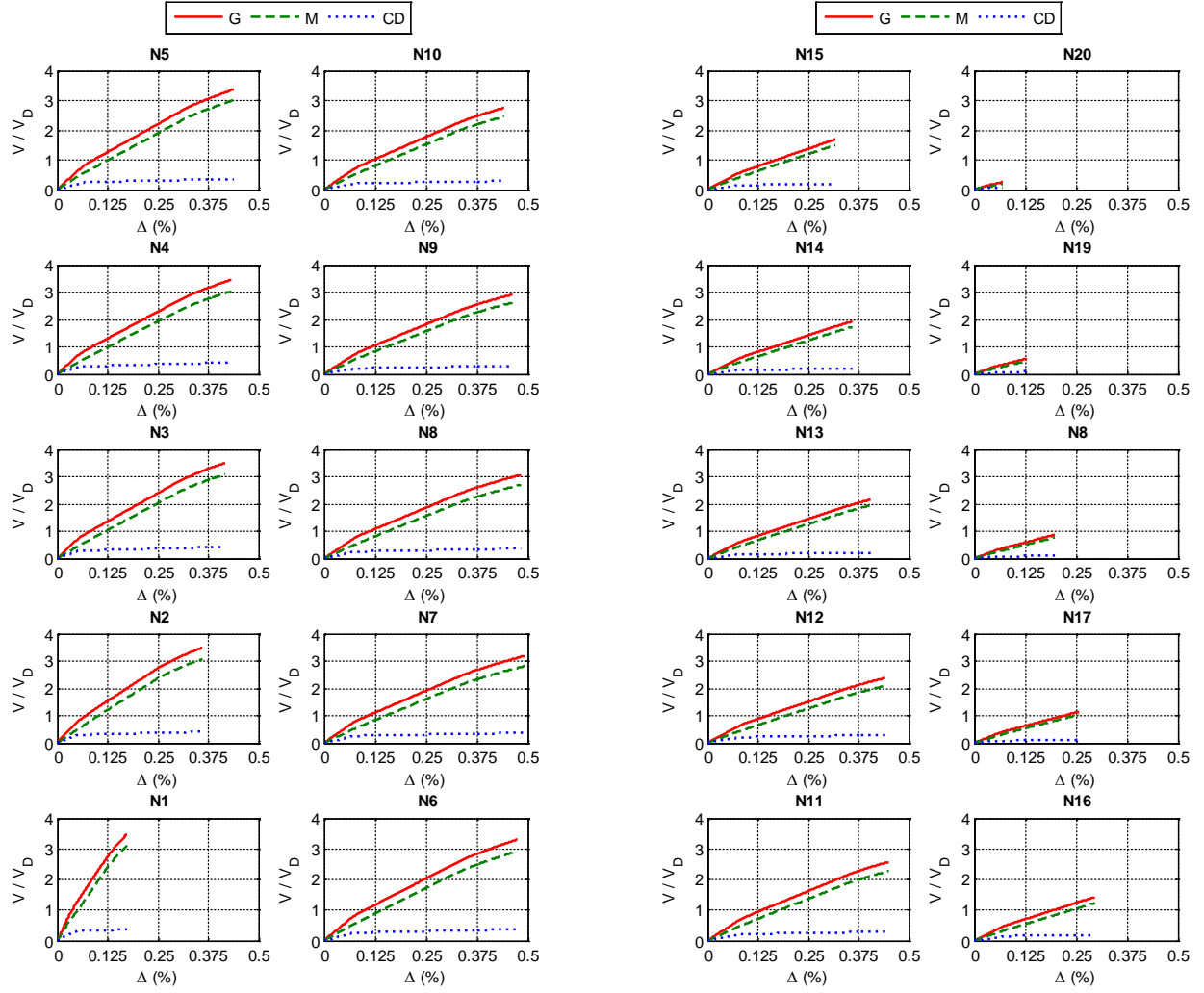


Figura A.215 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

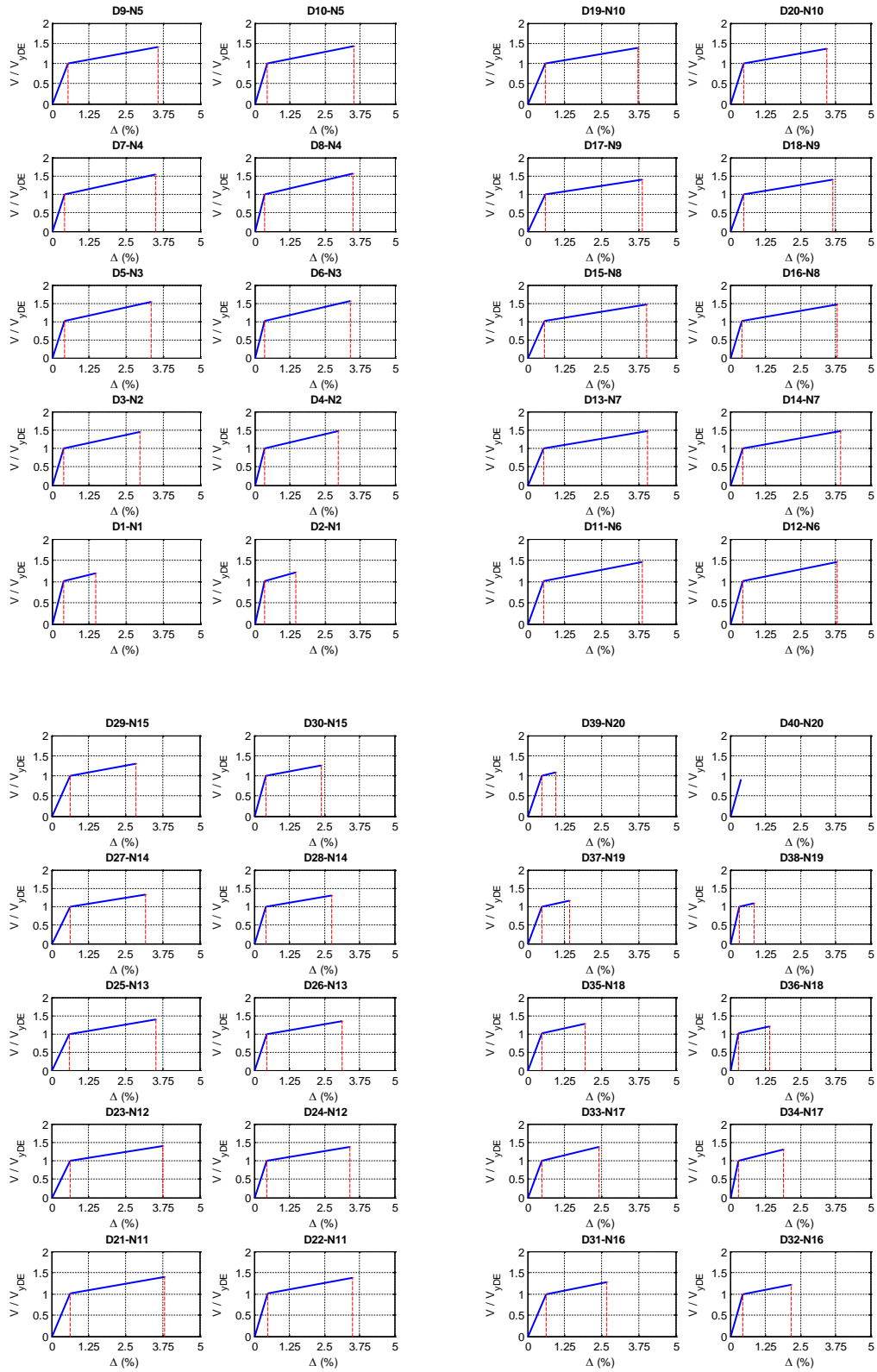


Figura A.216 $N = 20, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

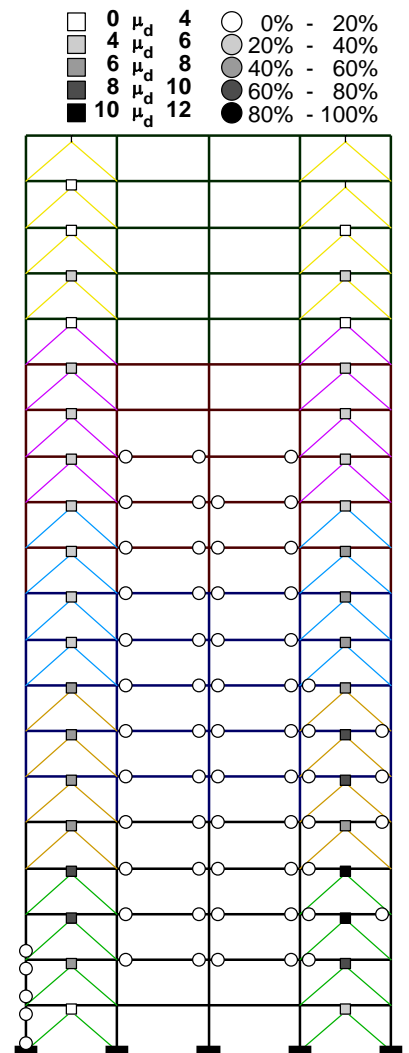
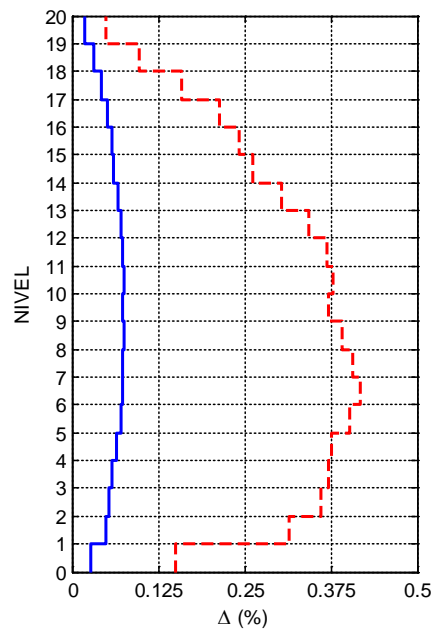
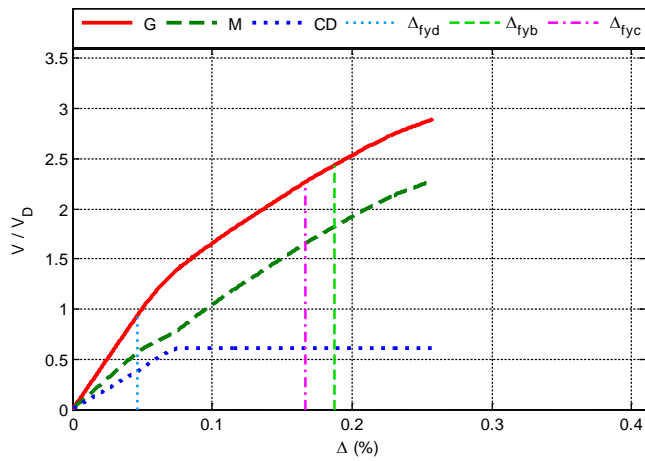


Figura A.217 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

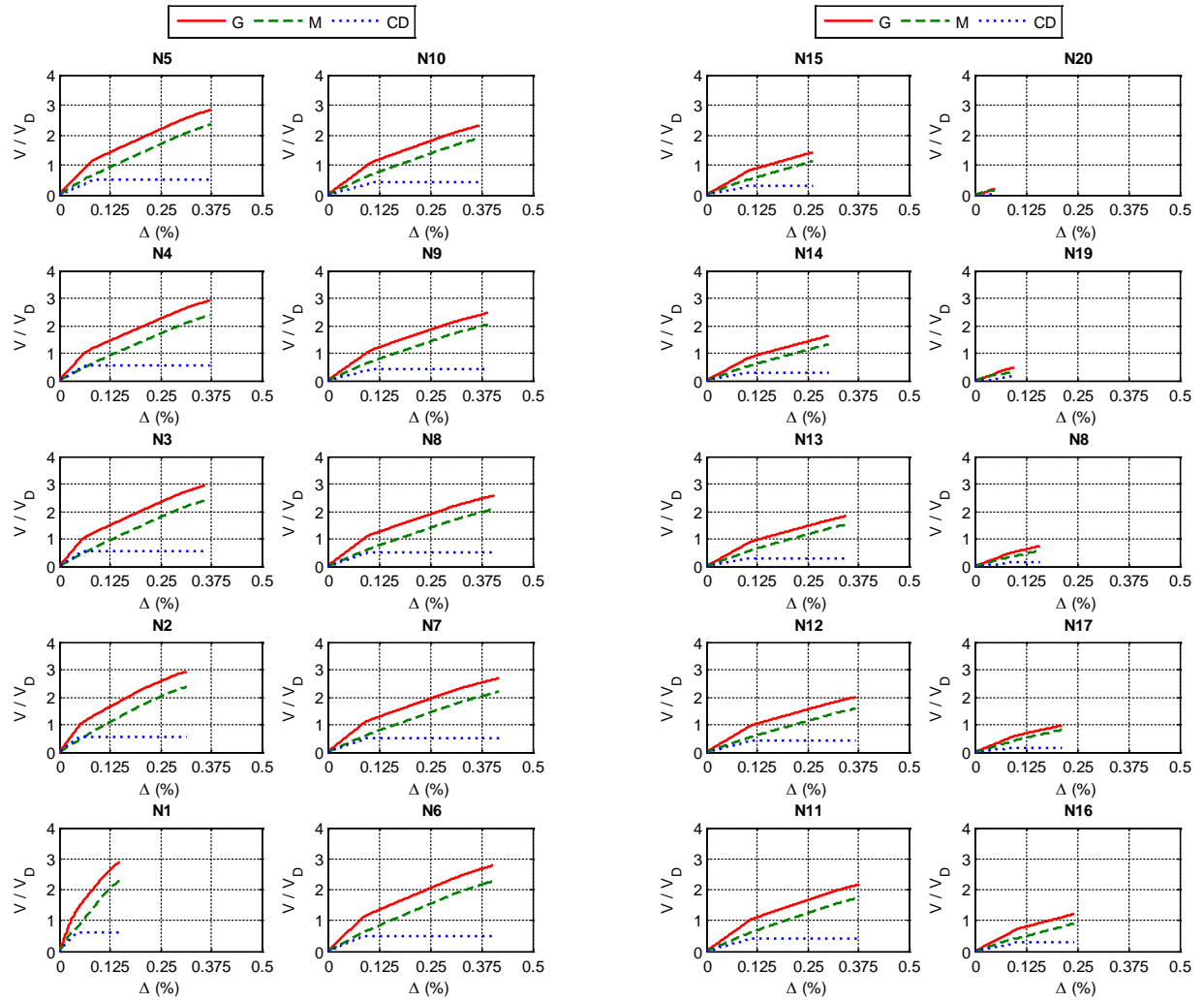


Figura A.218 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

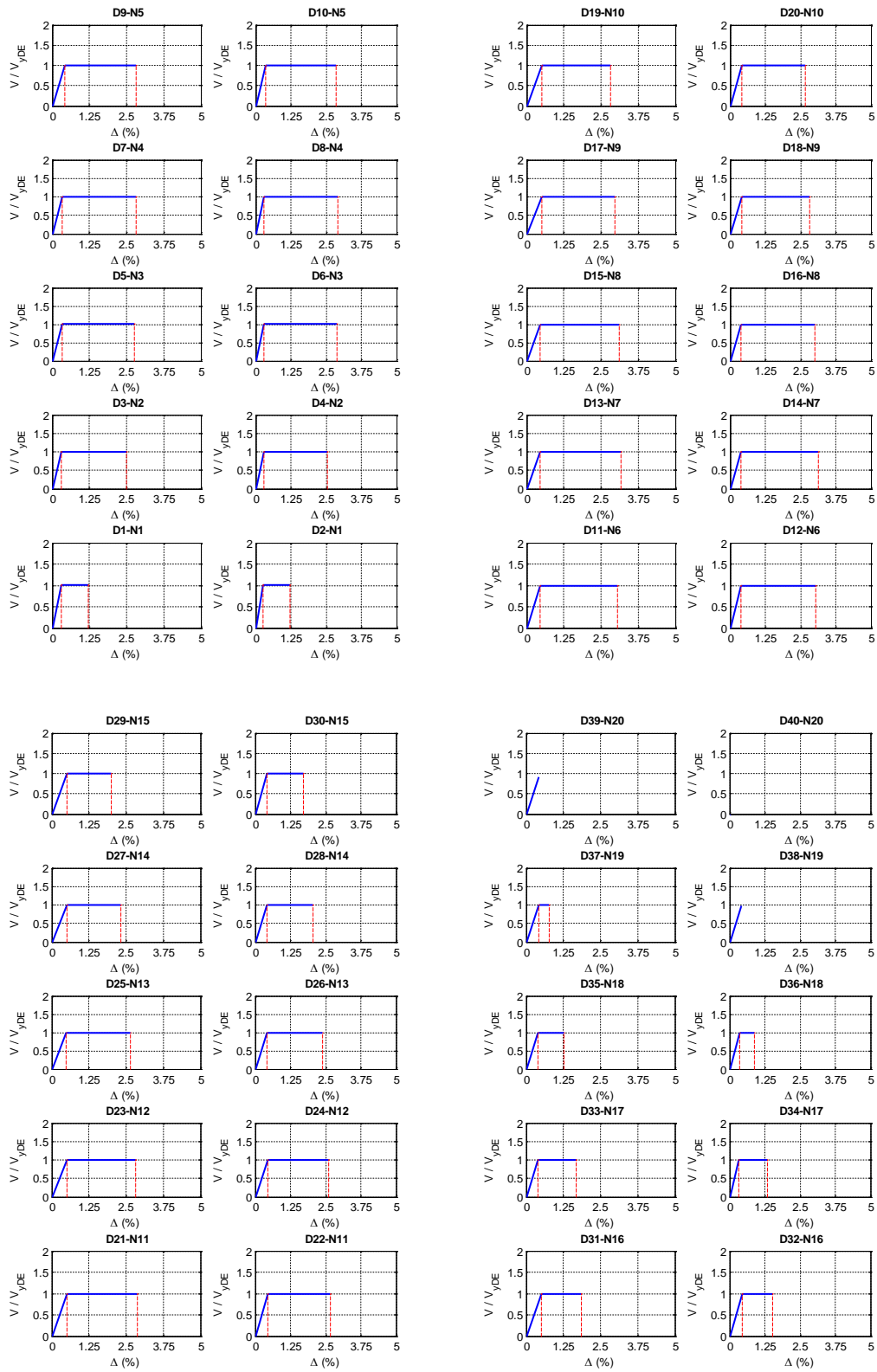


Figura A.219 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

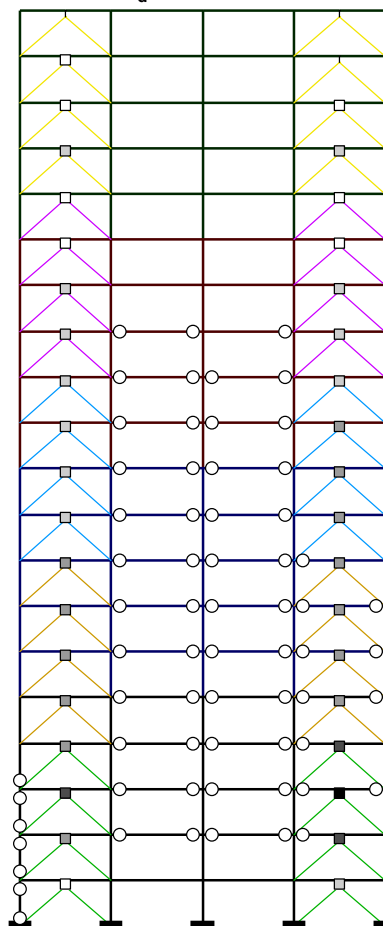
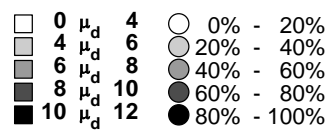
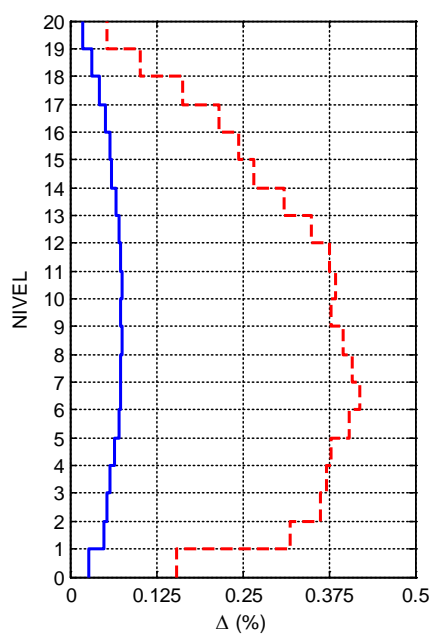
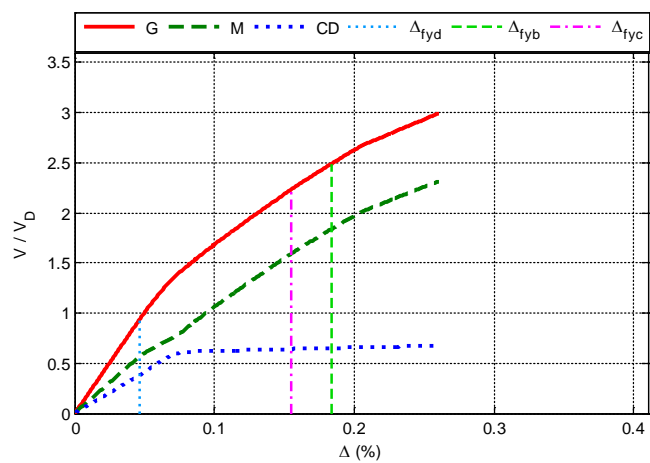


Figura A.220 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

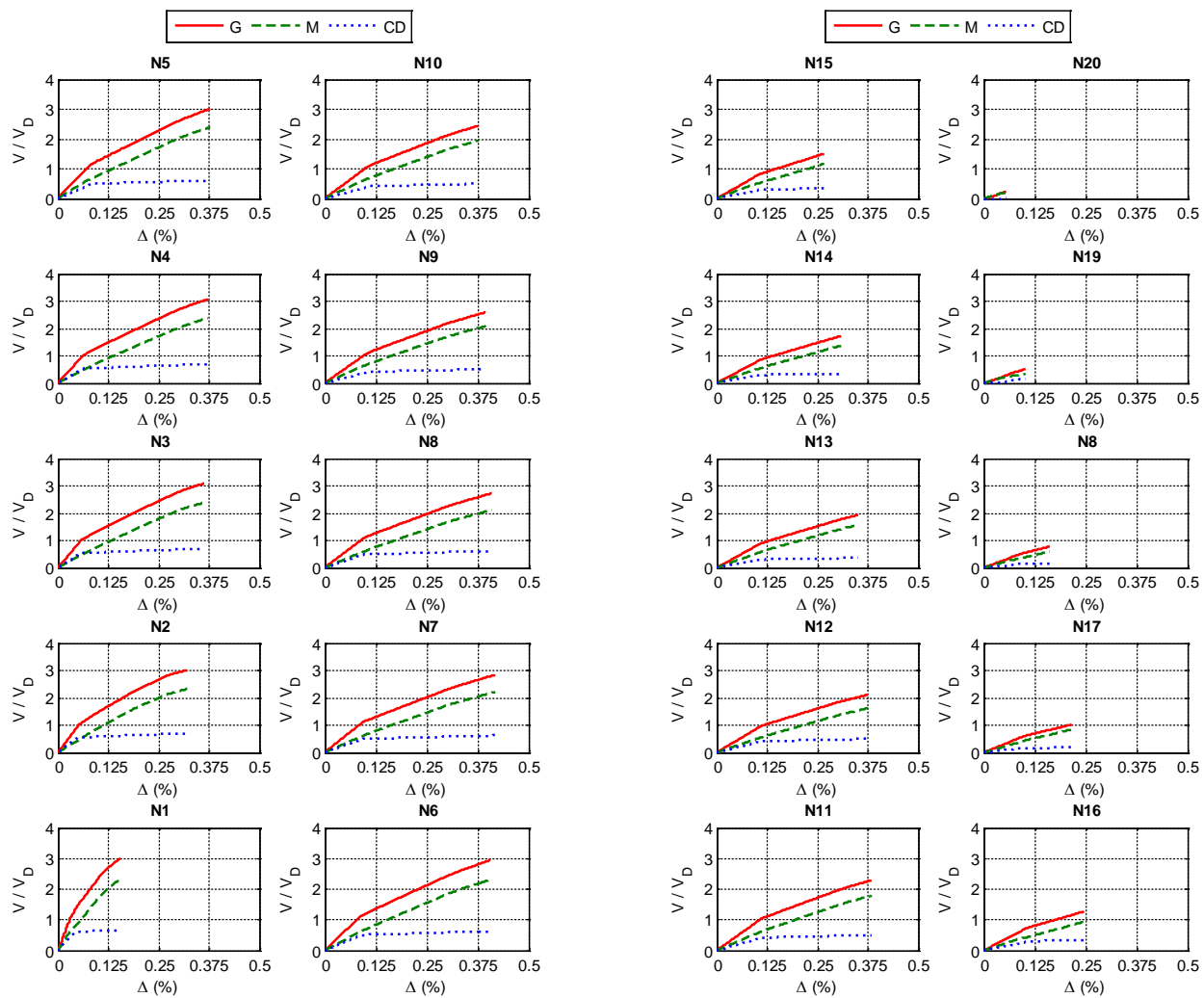


Figura A.221 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

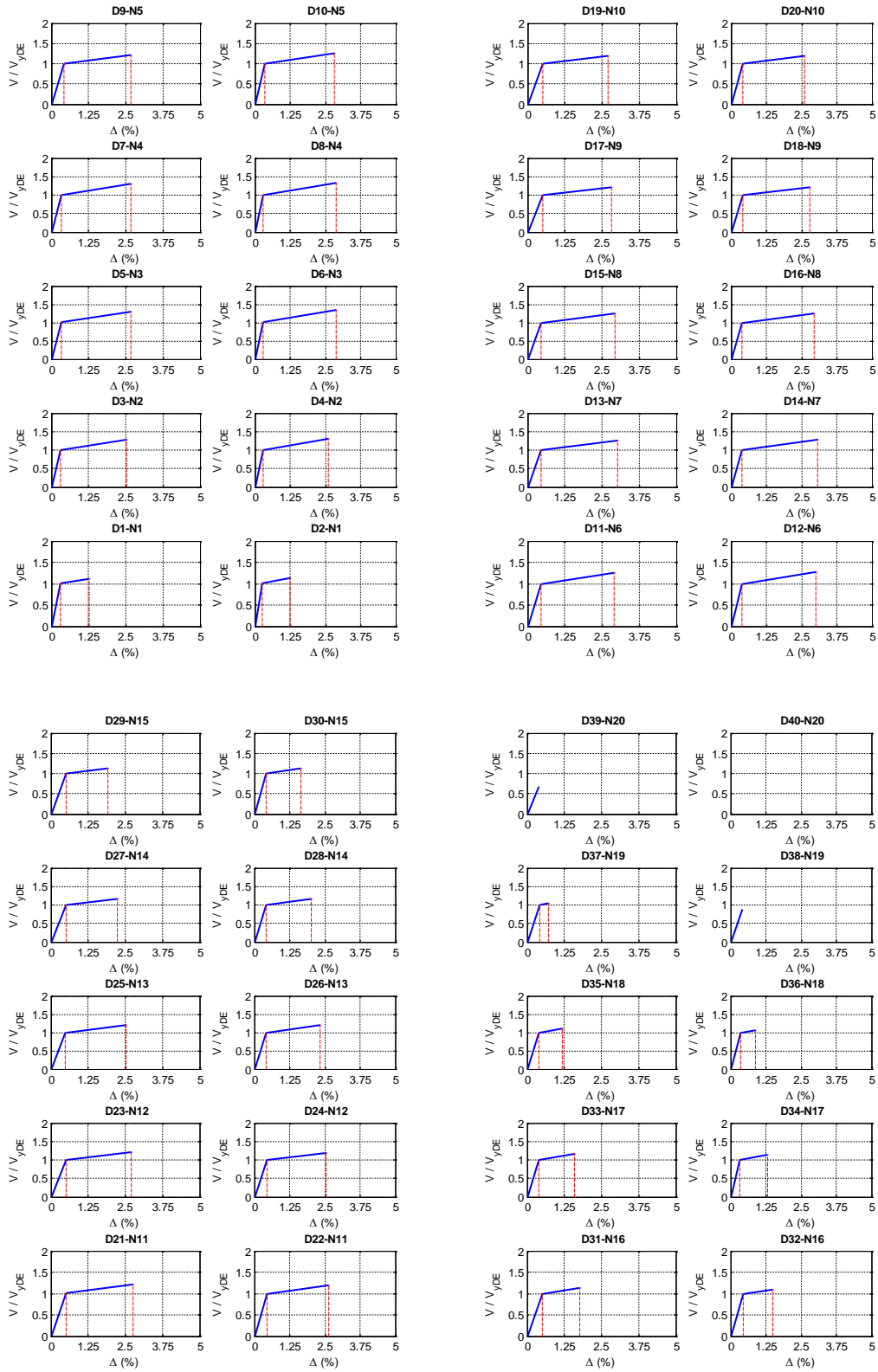


Figura A.222 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

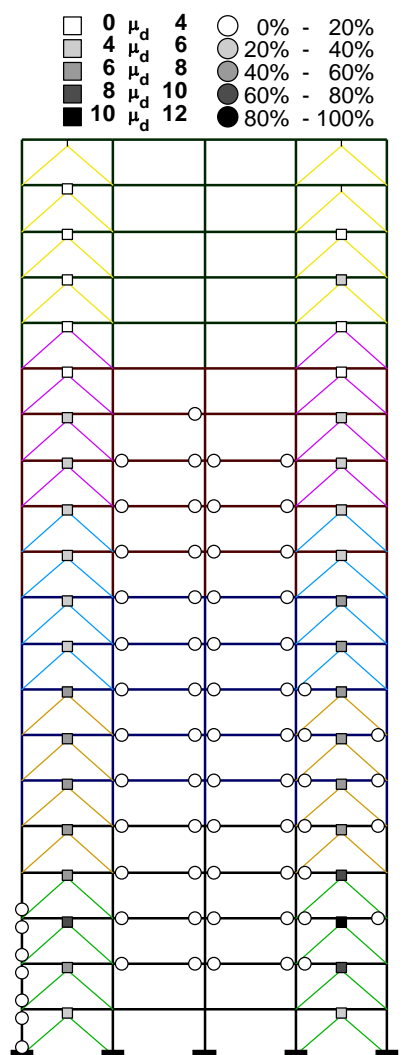
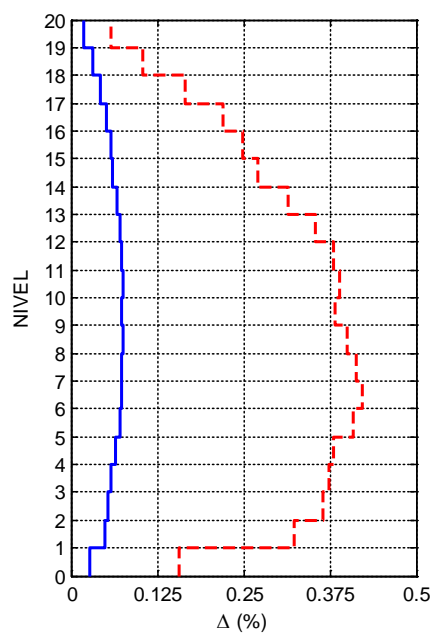
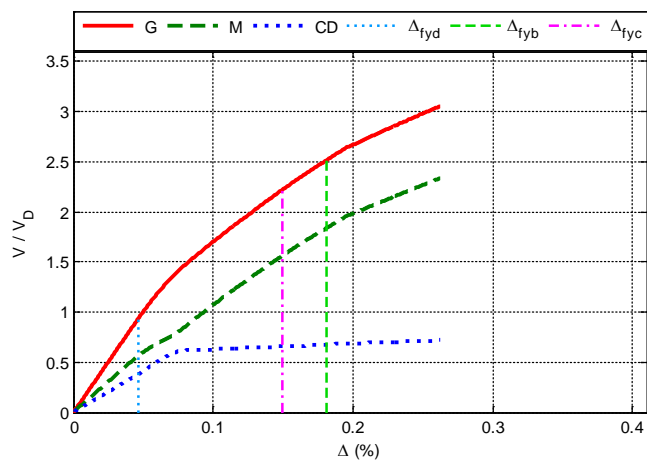


Figura A.223 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

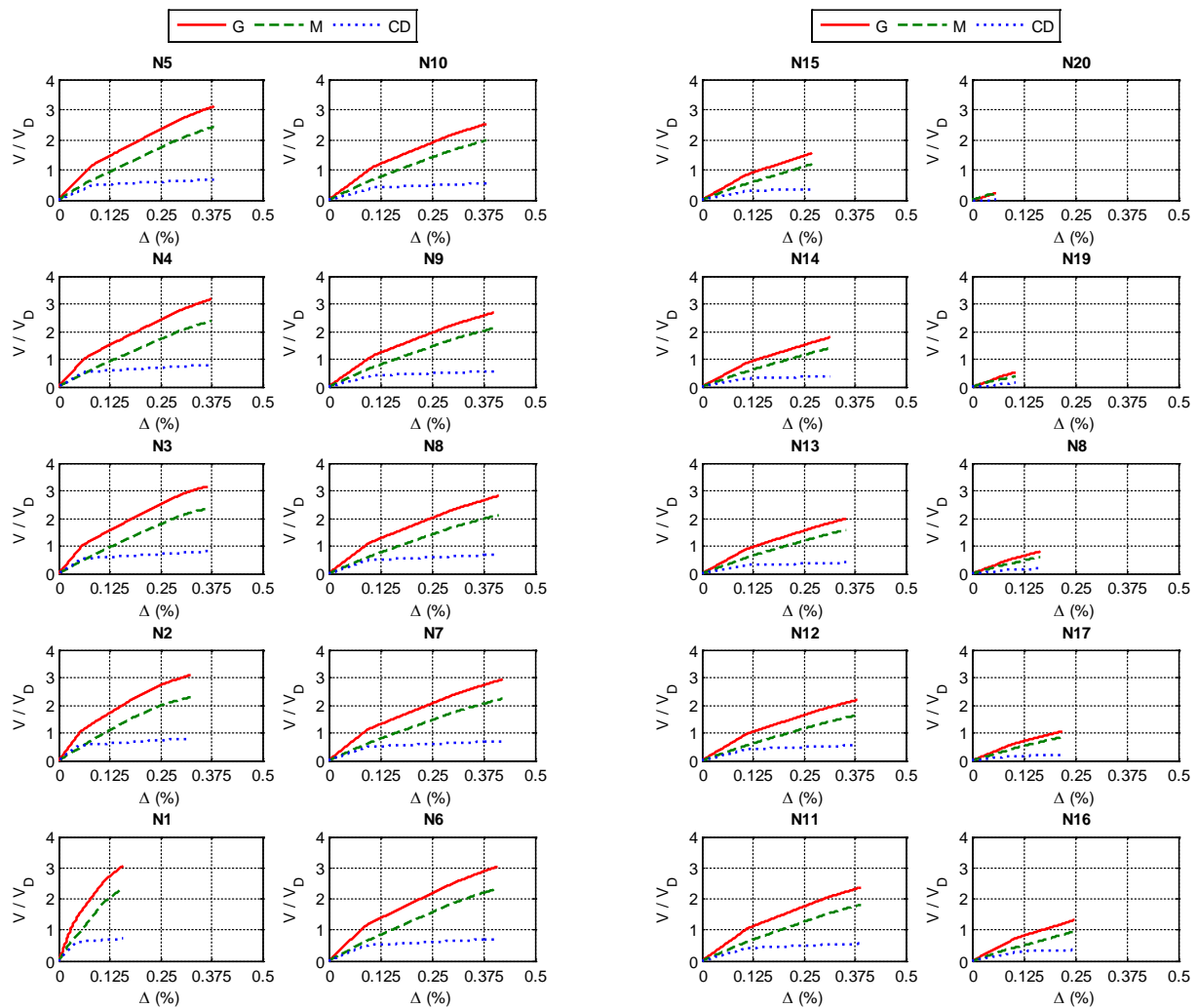


Figura A.224 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

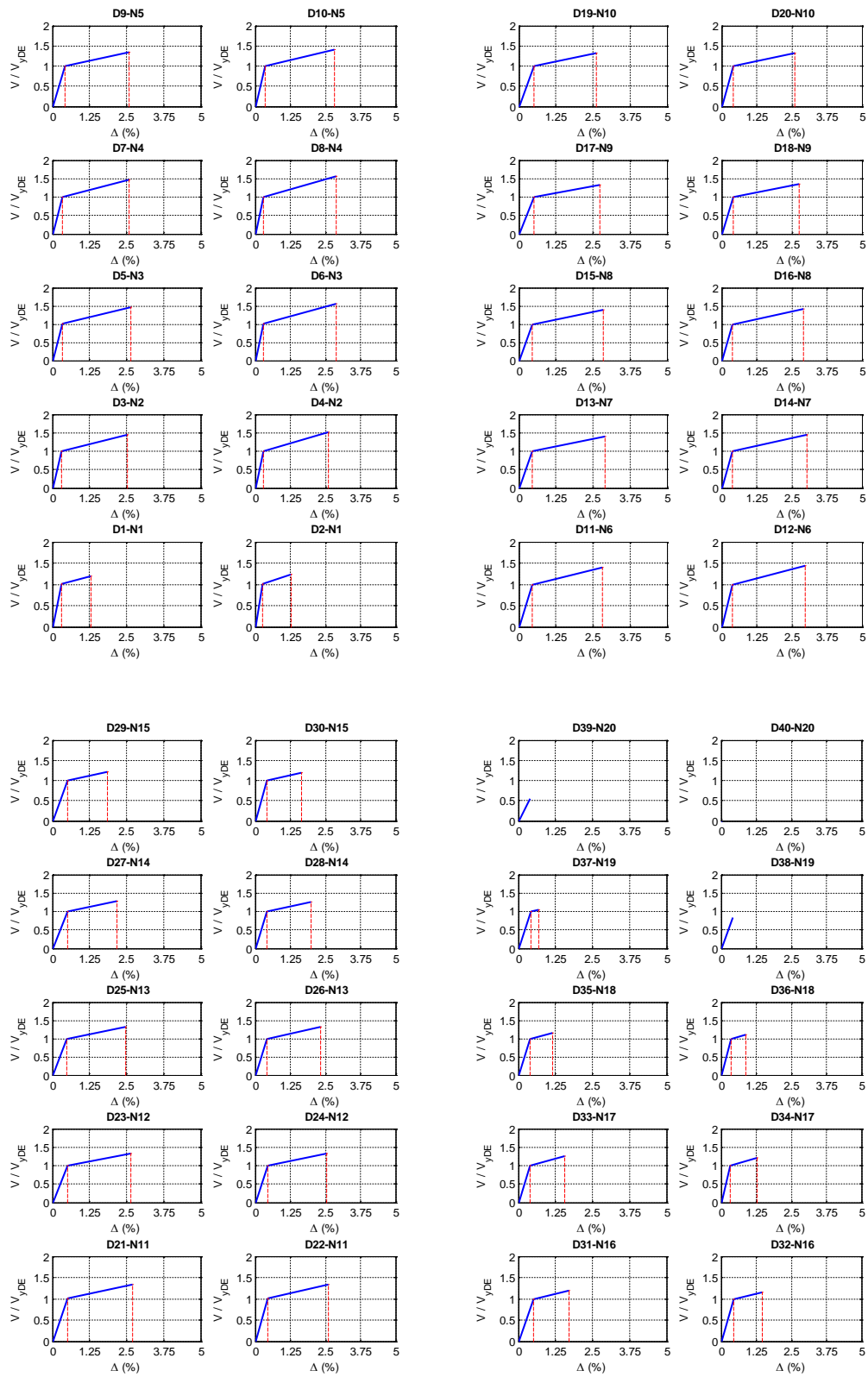


Figura A.225 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

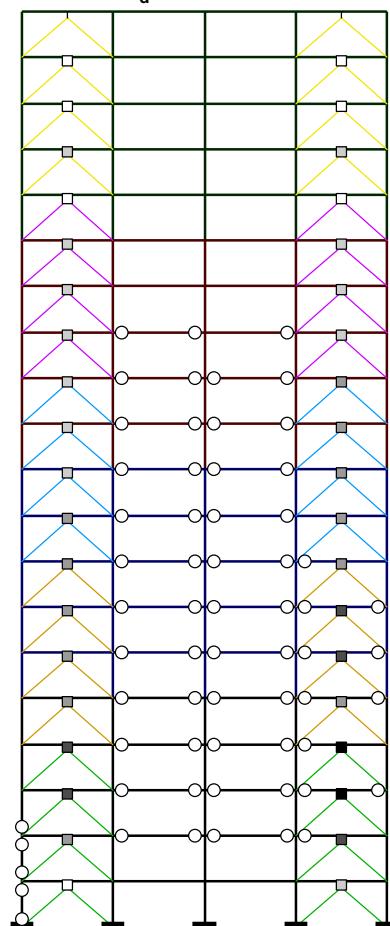
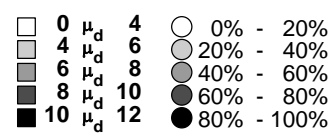
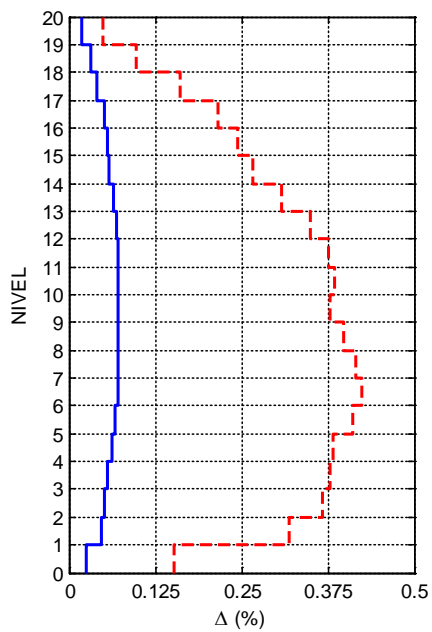
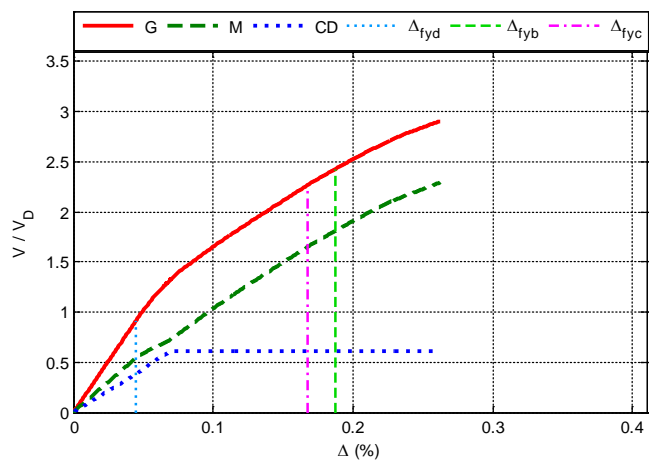


Figura A.226 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

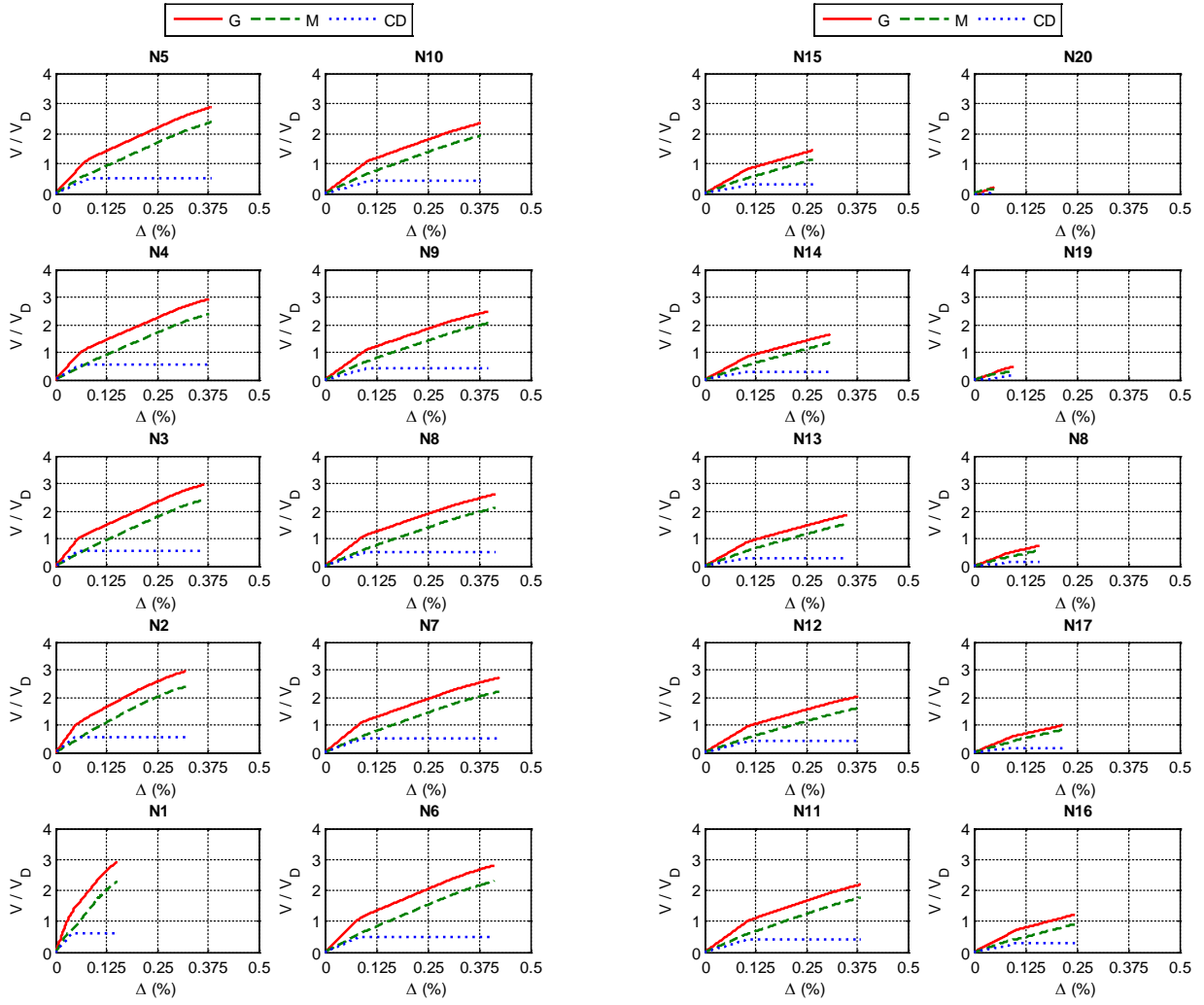


Figura A.227 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

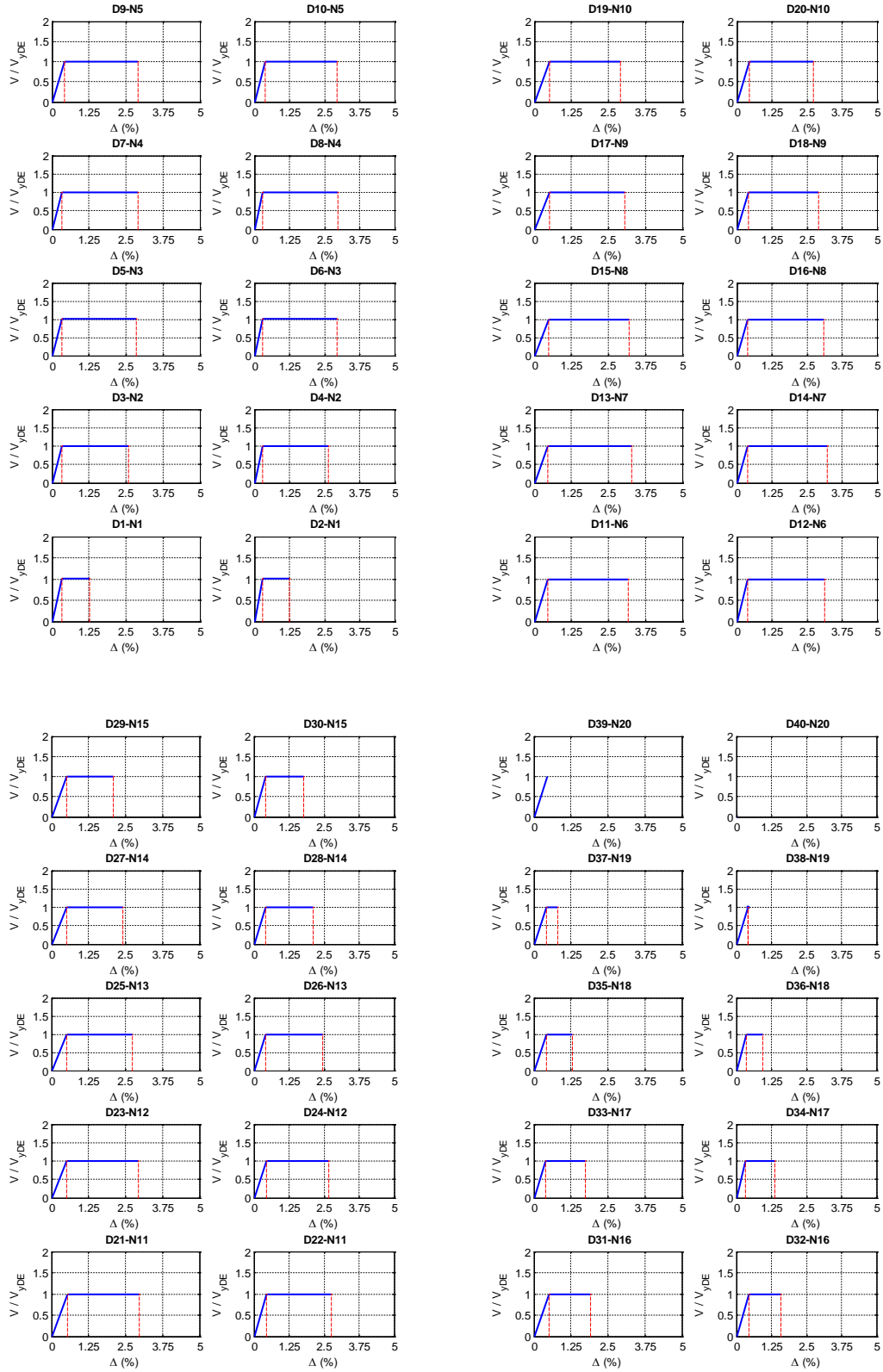


Figura A.228 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

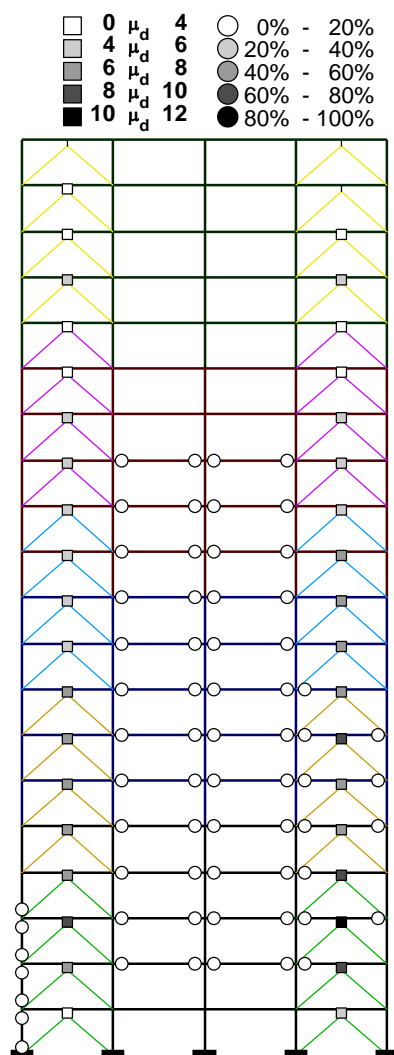
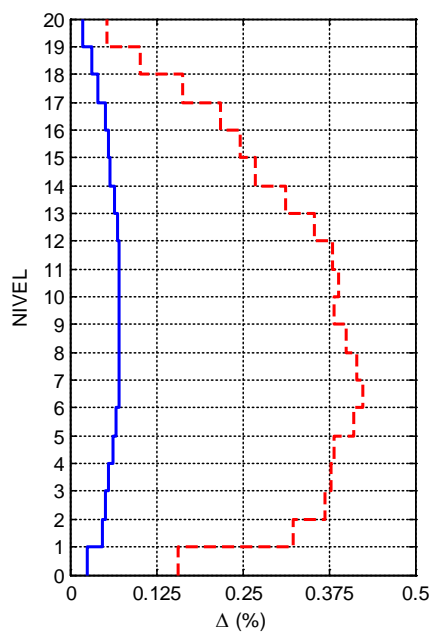
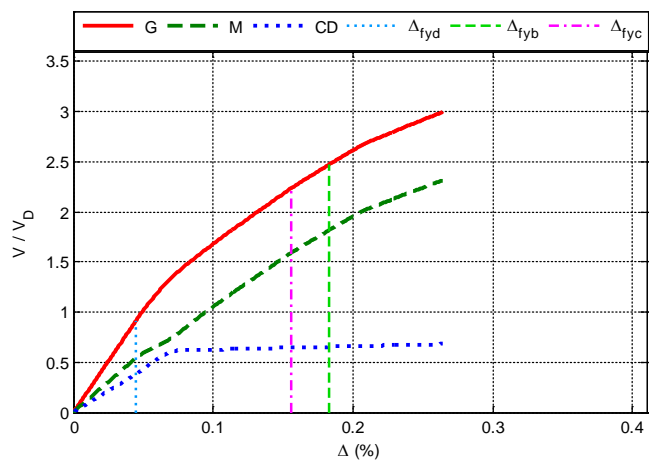


Figura A.229 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

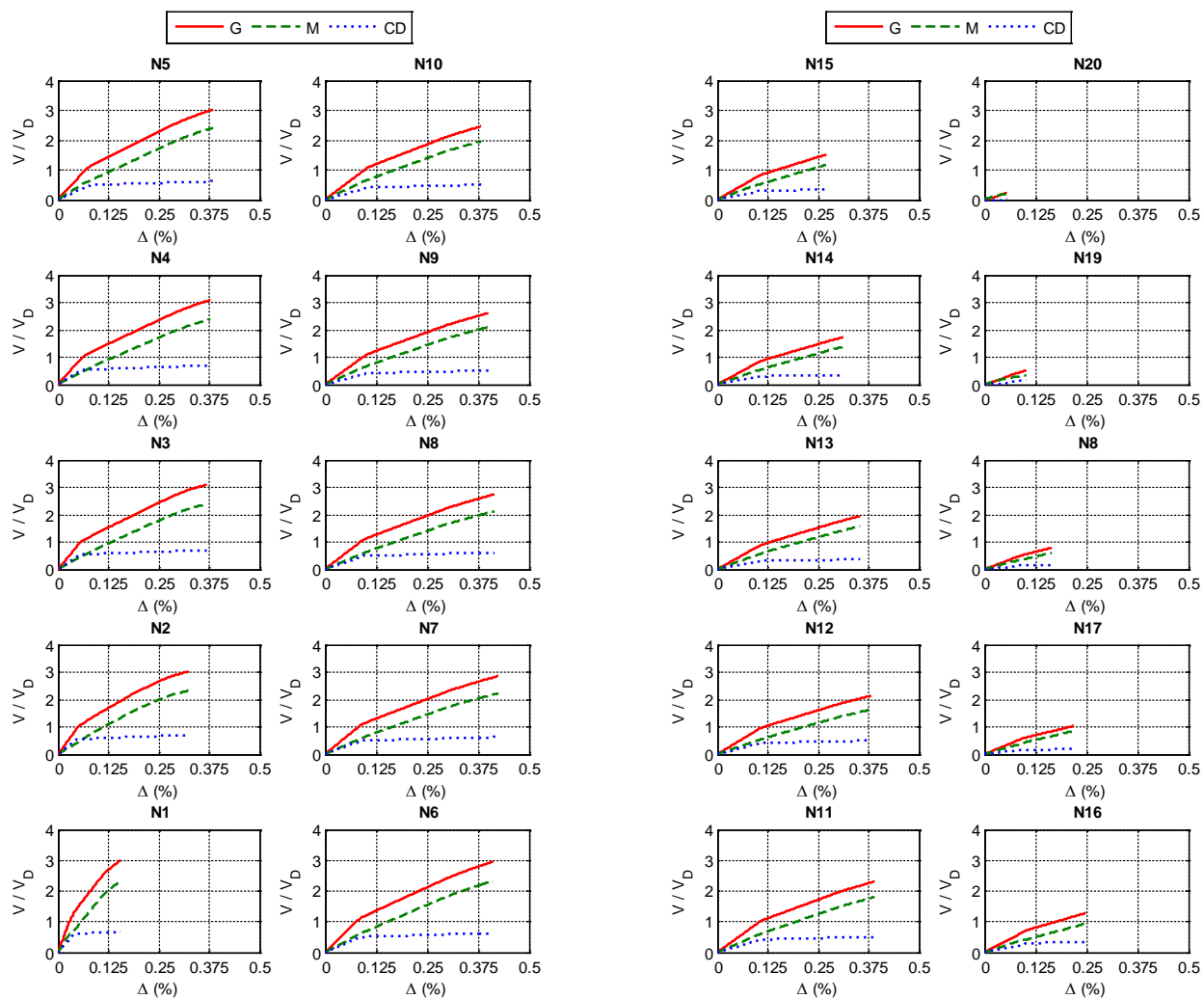


Figura A.230 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

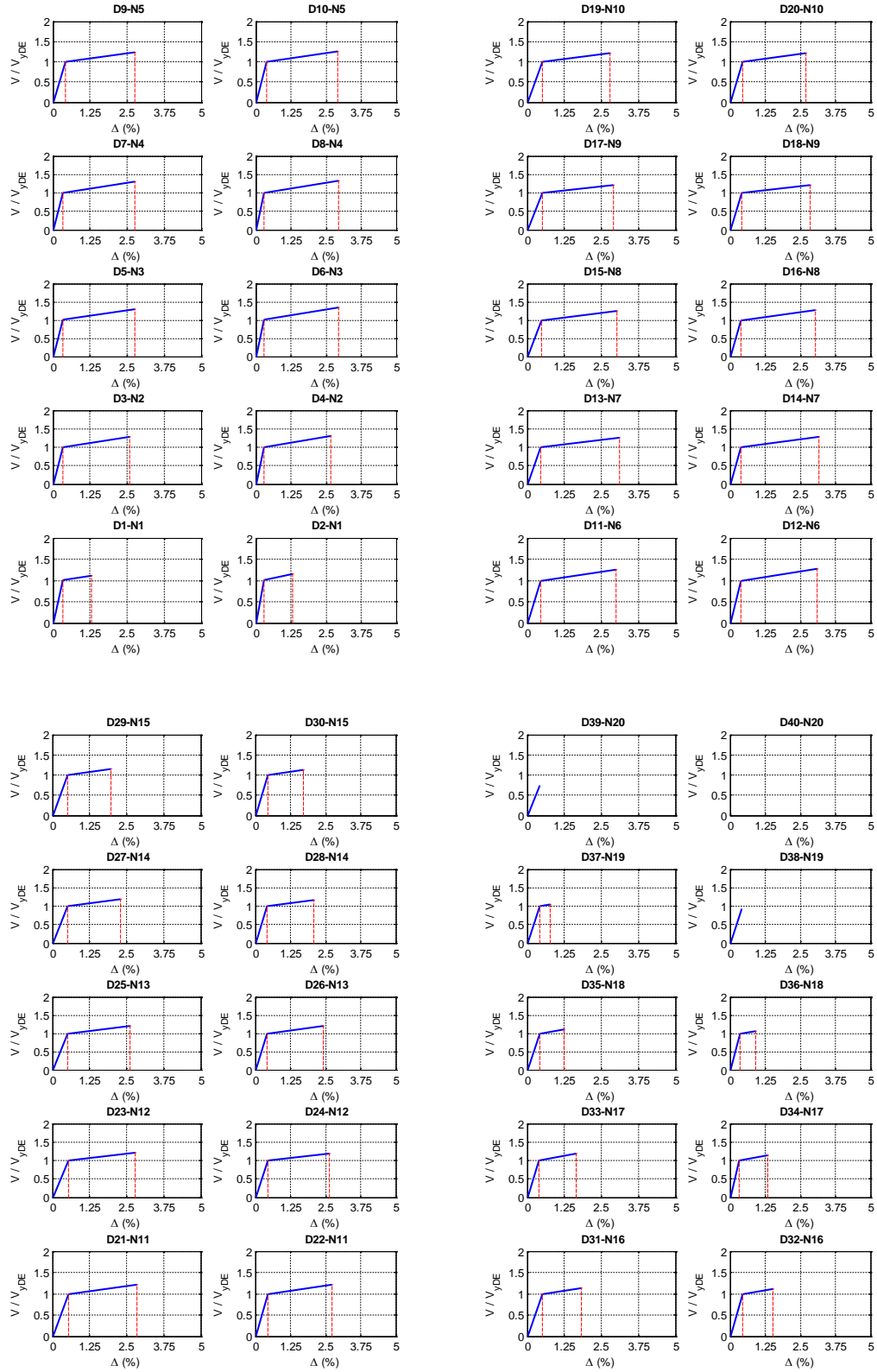


Figura A.231 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

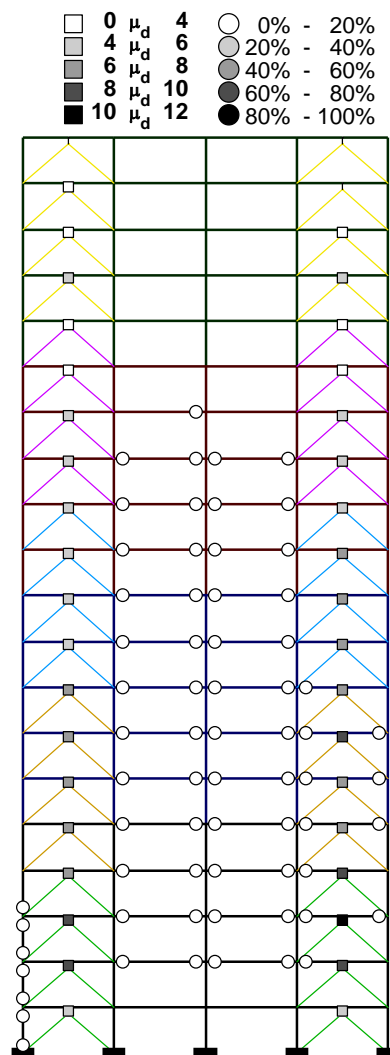
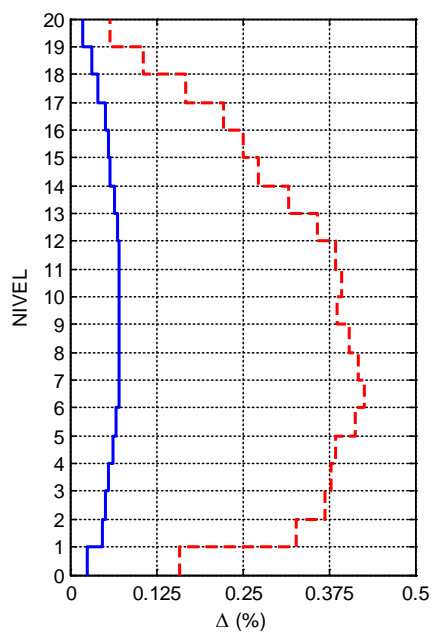
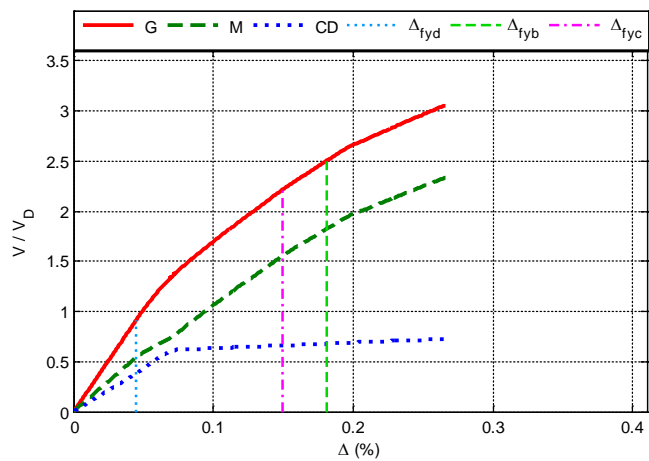


Figura A.232 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

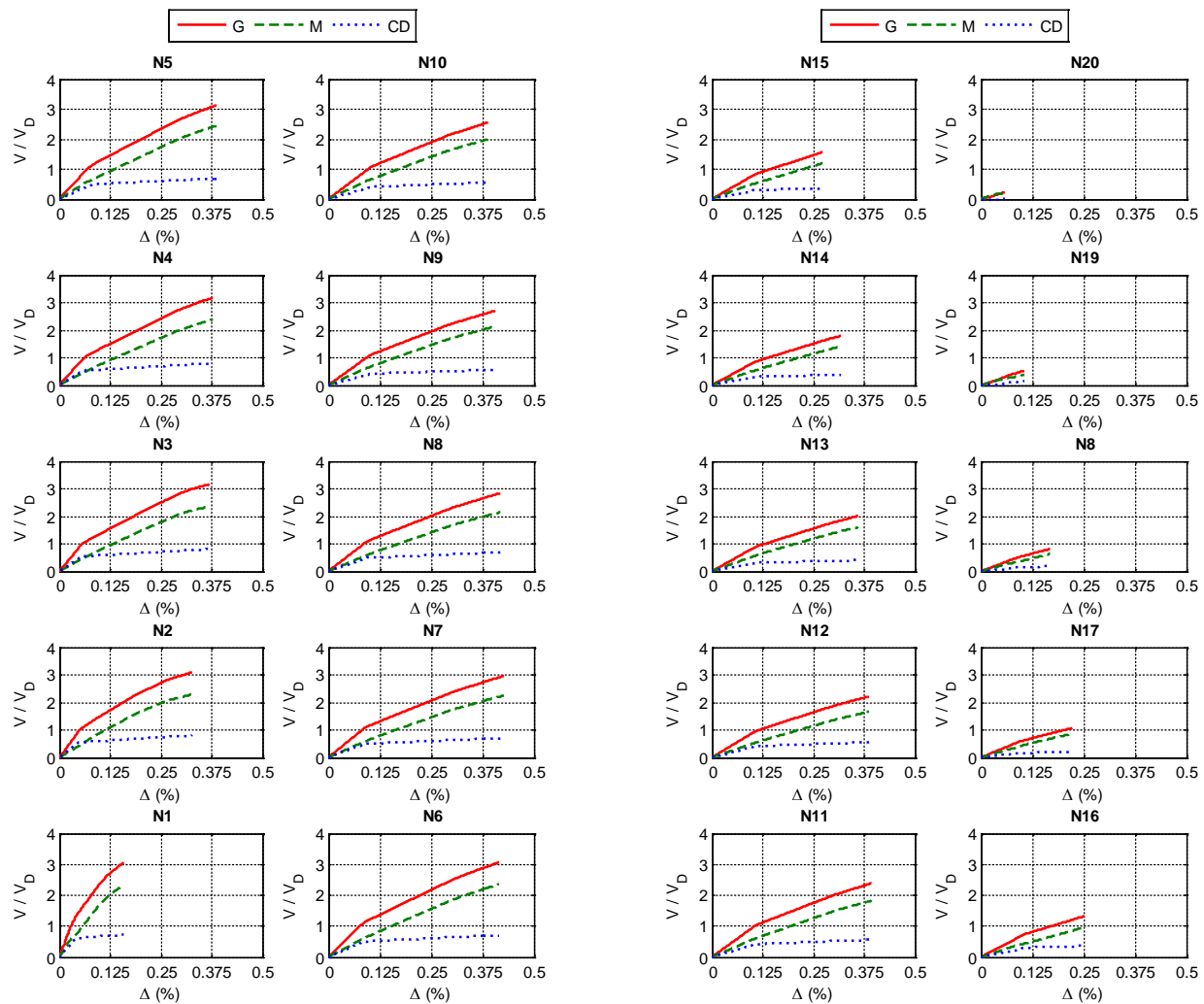


Figura A.233 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

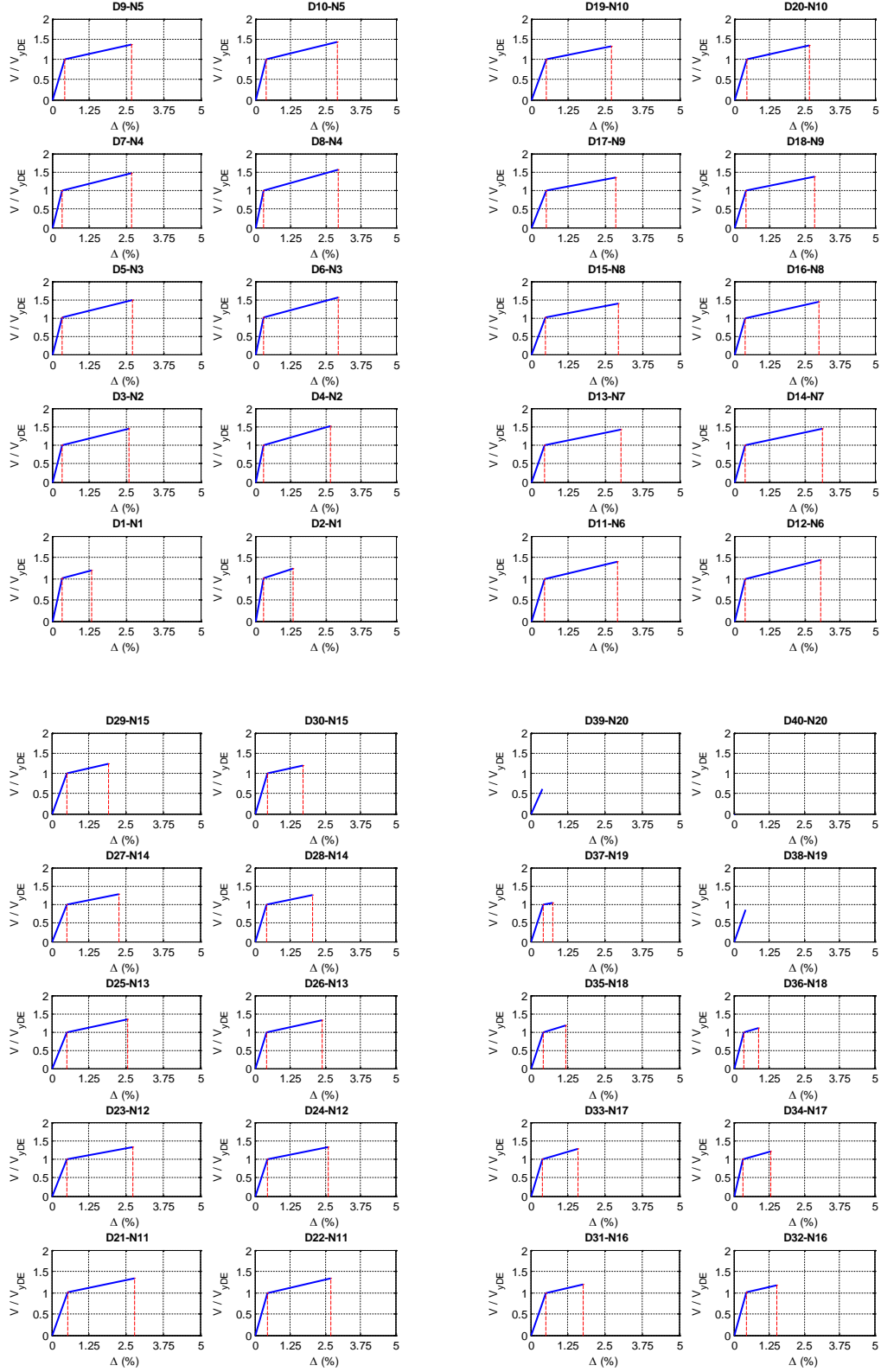


Figura A.234 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

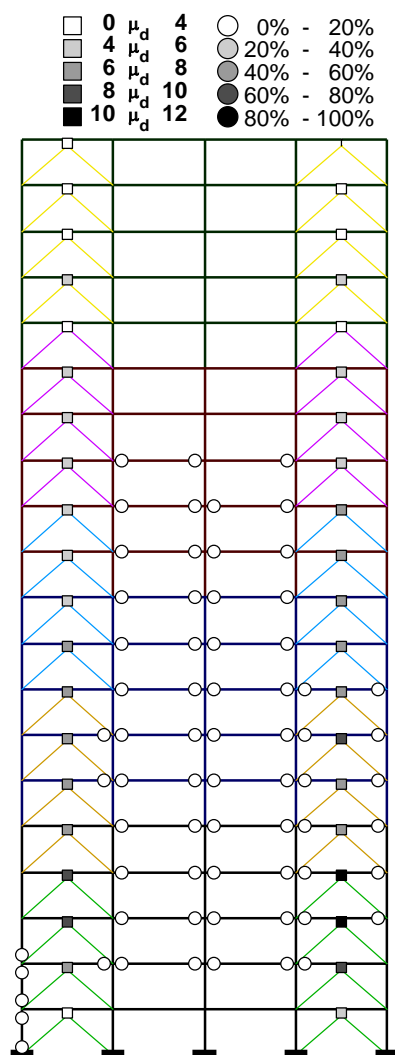
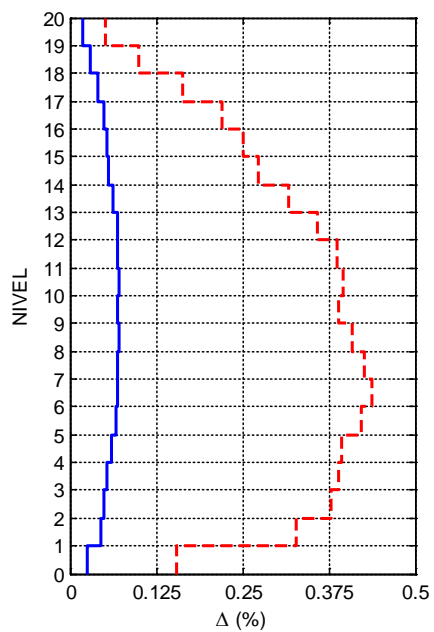
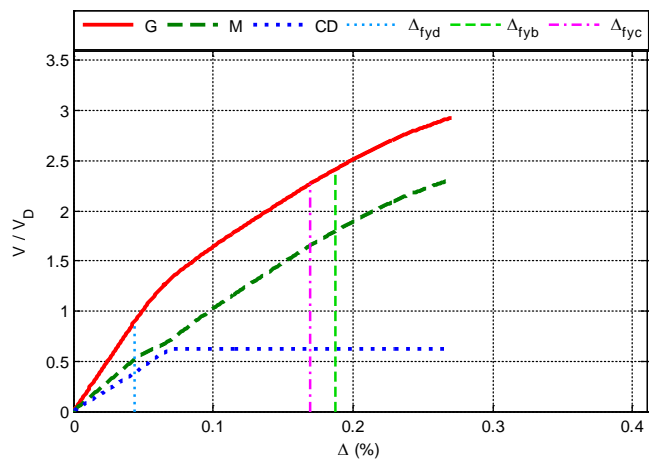


Figura A.235 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

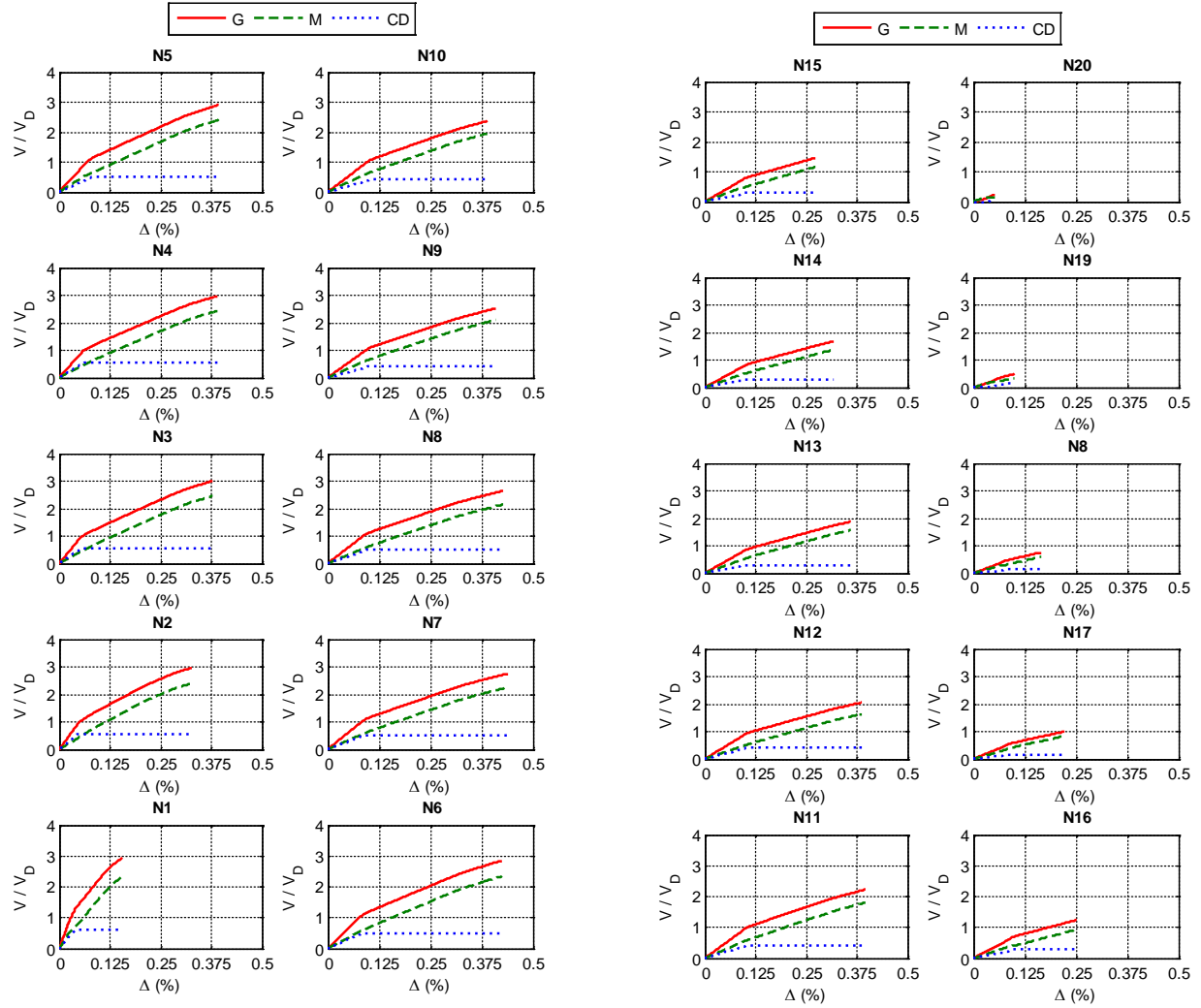


Figura A.236 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

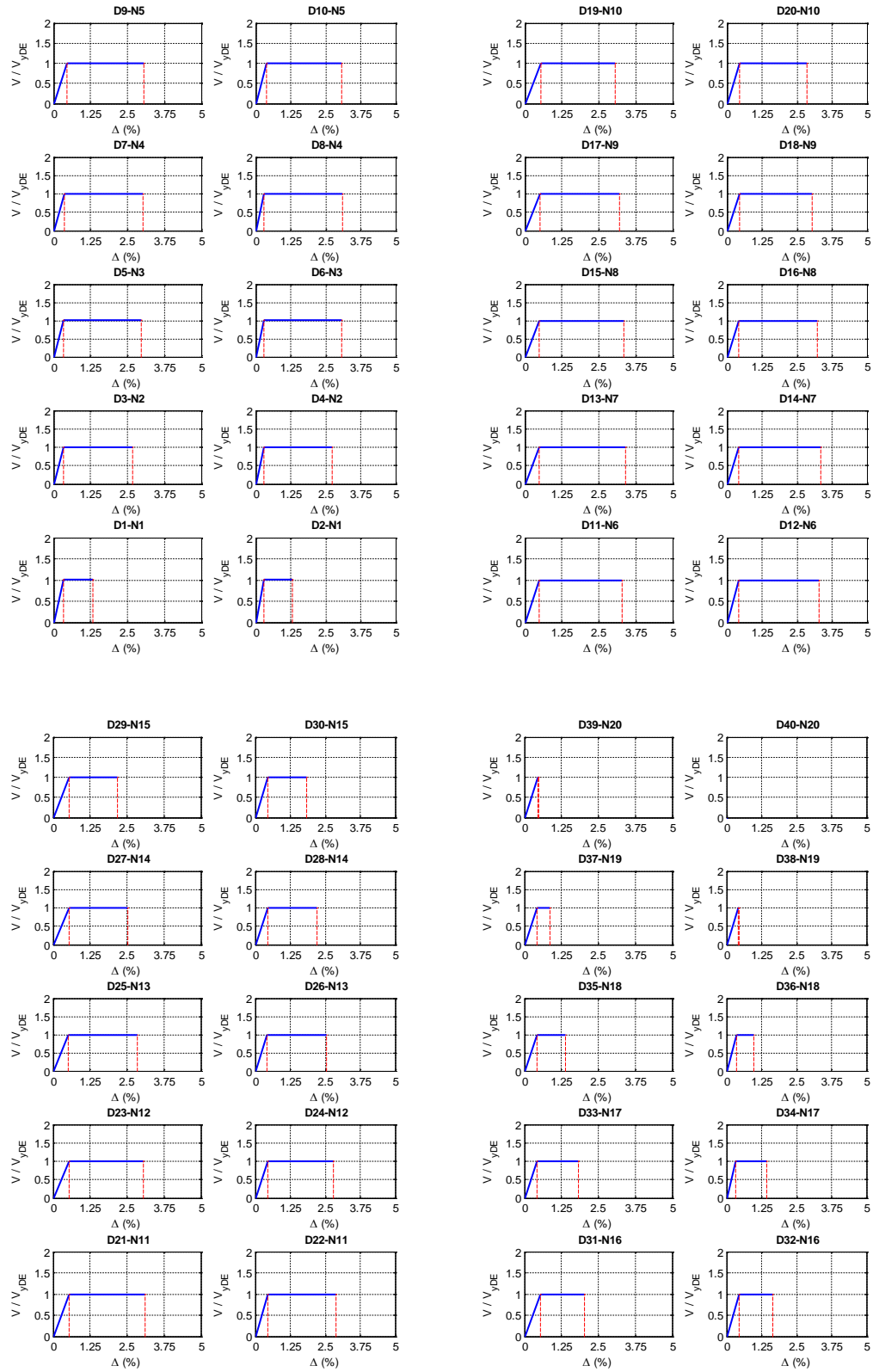


Figura A.237 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

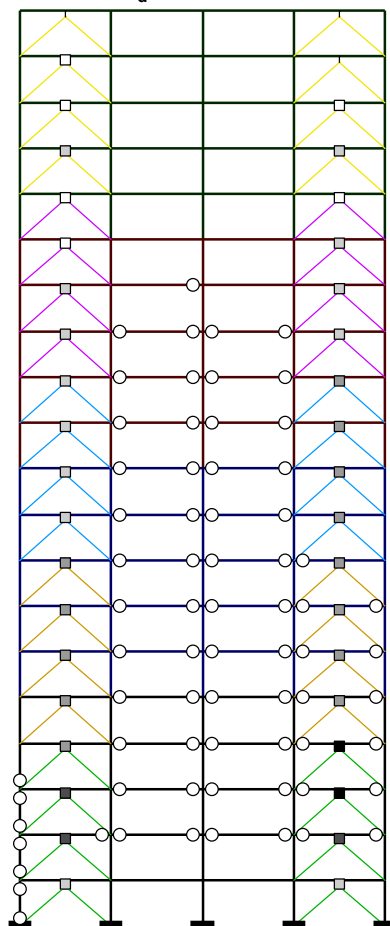
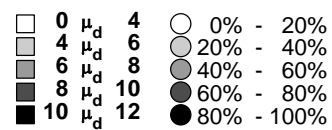
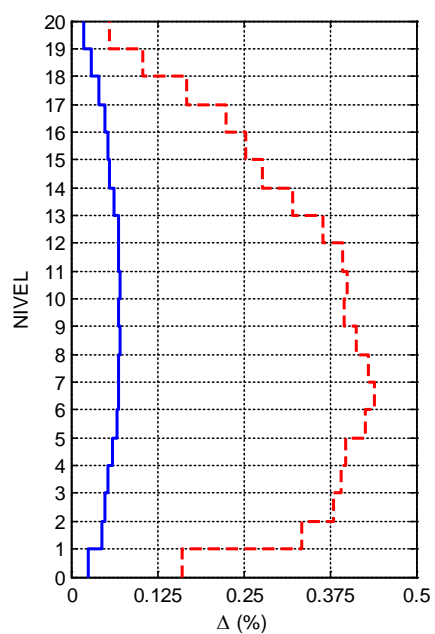
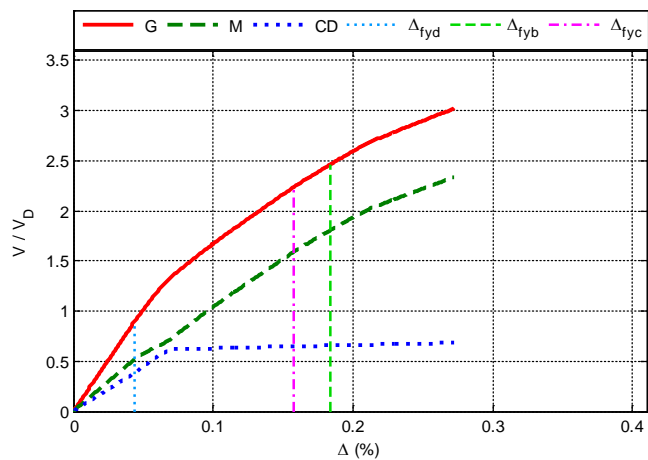


Figura A.238 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

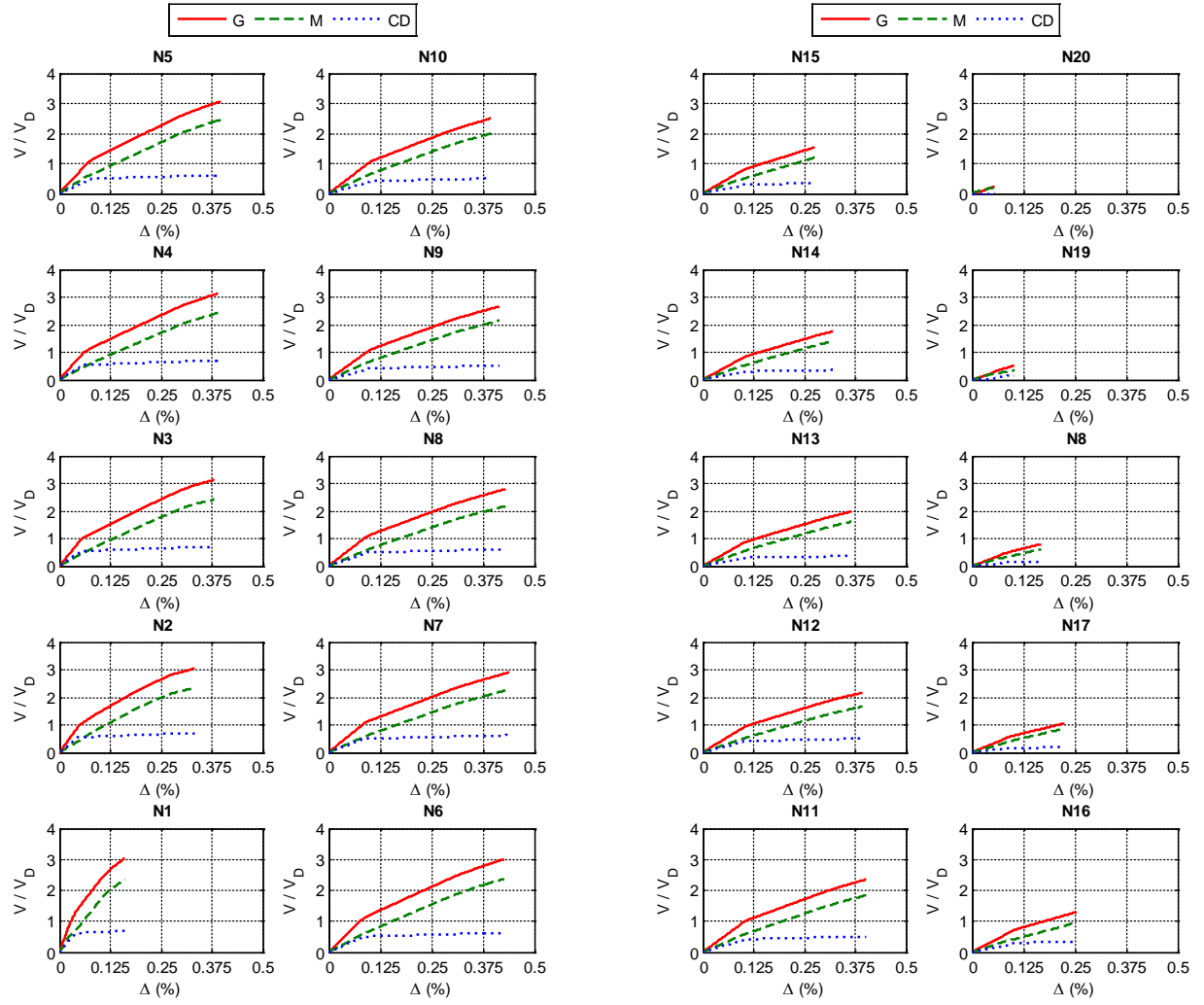


Figura A.239 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

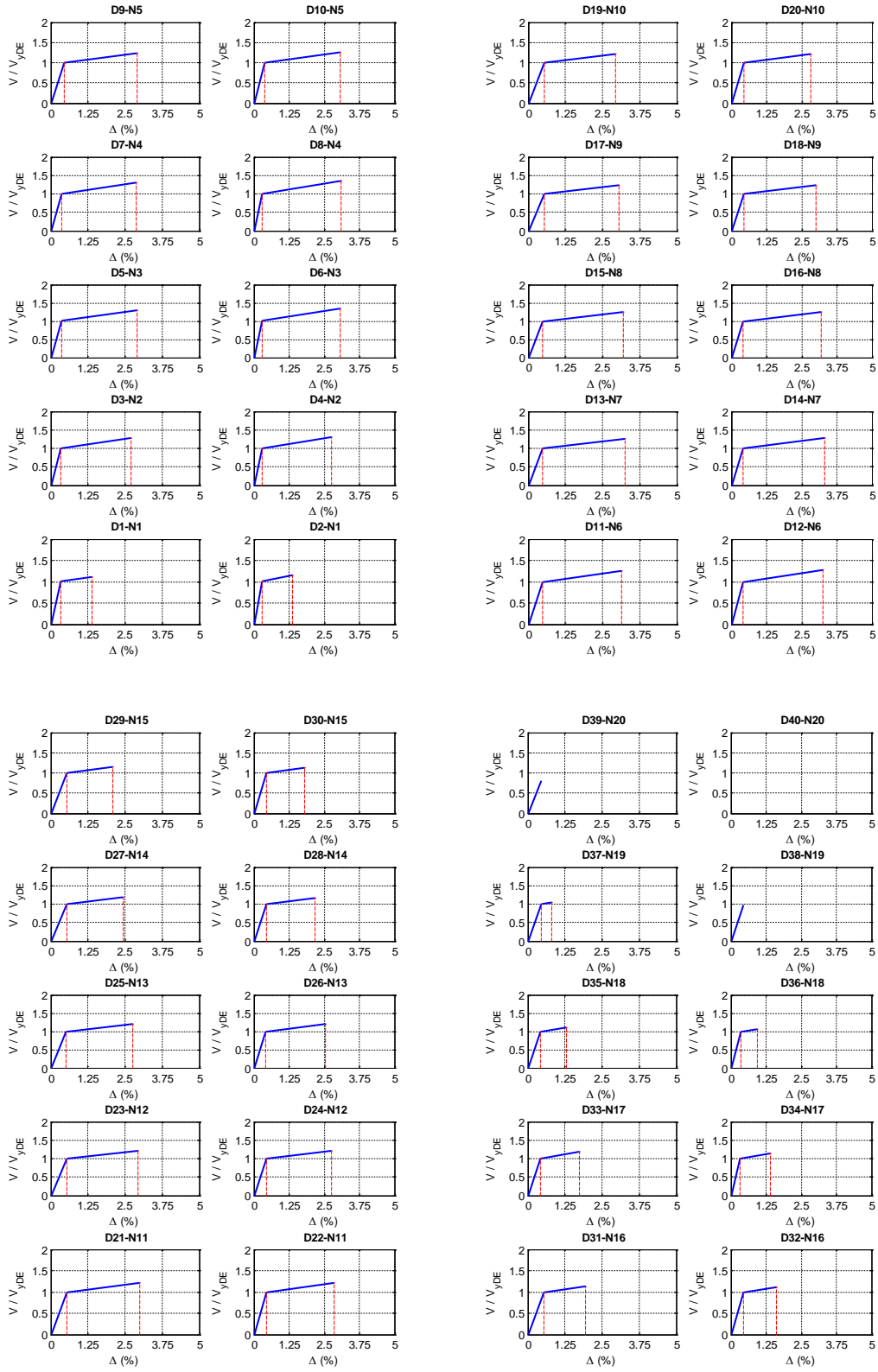


Figura A.240 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

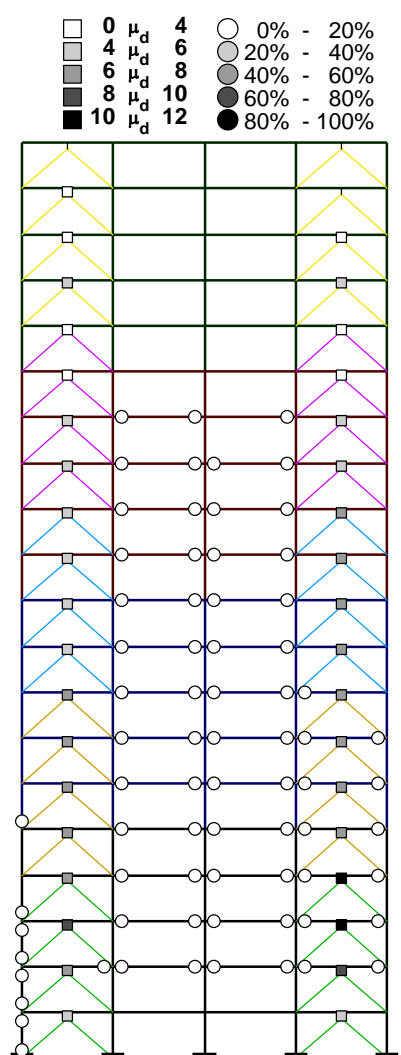
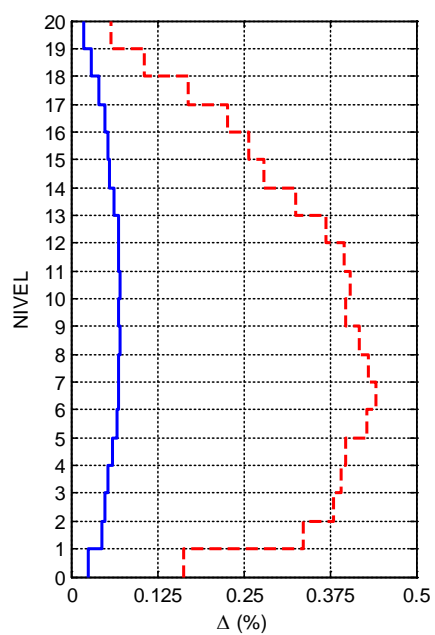
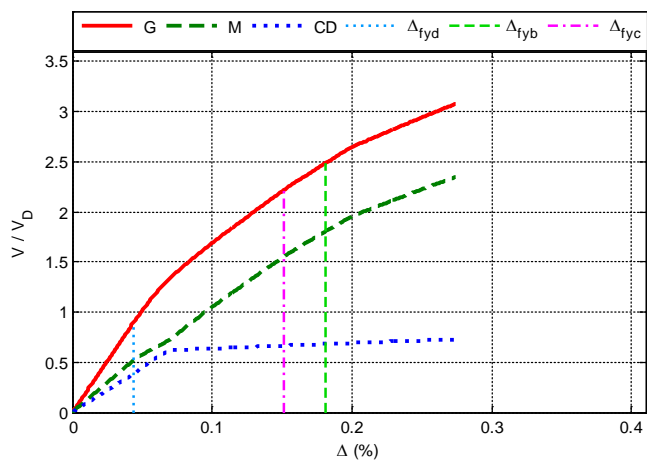


Figura A.241 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

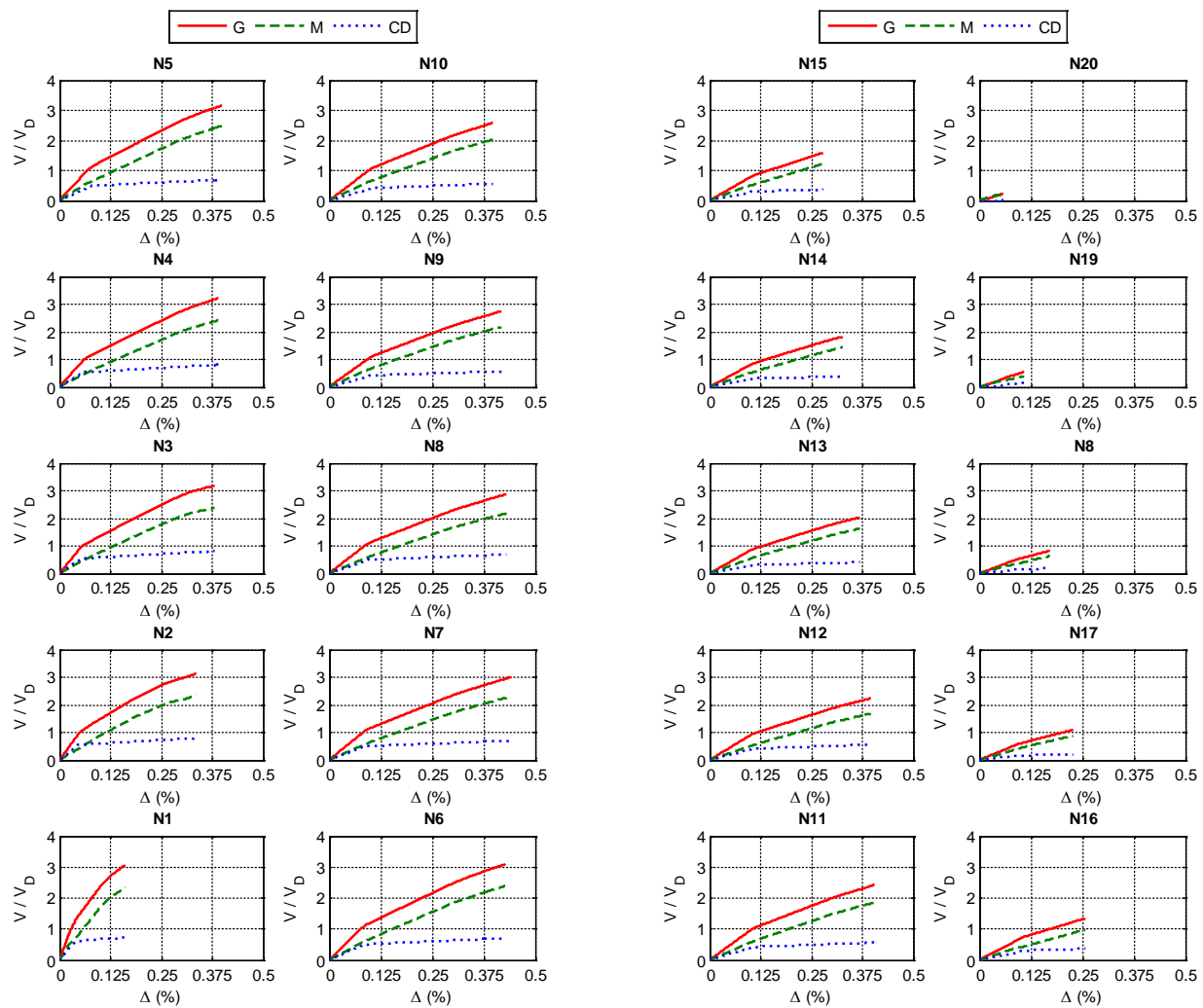


Figura A.242 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

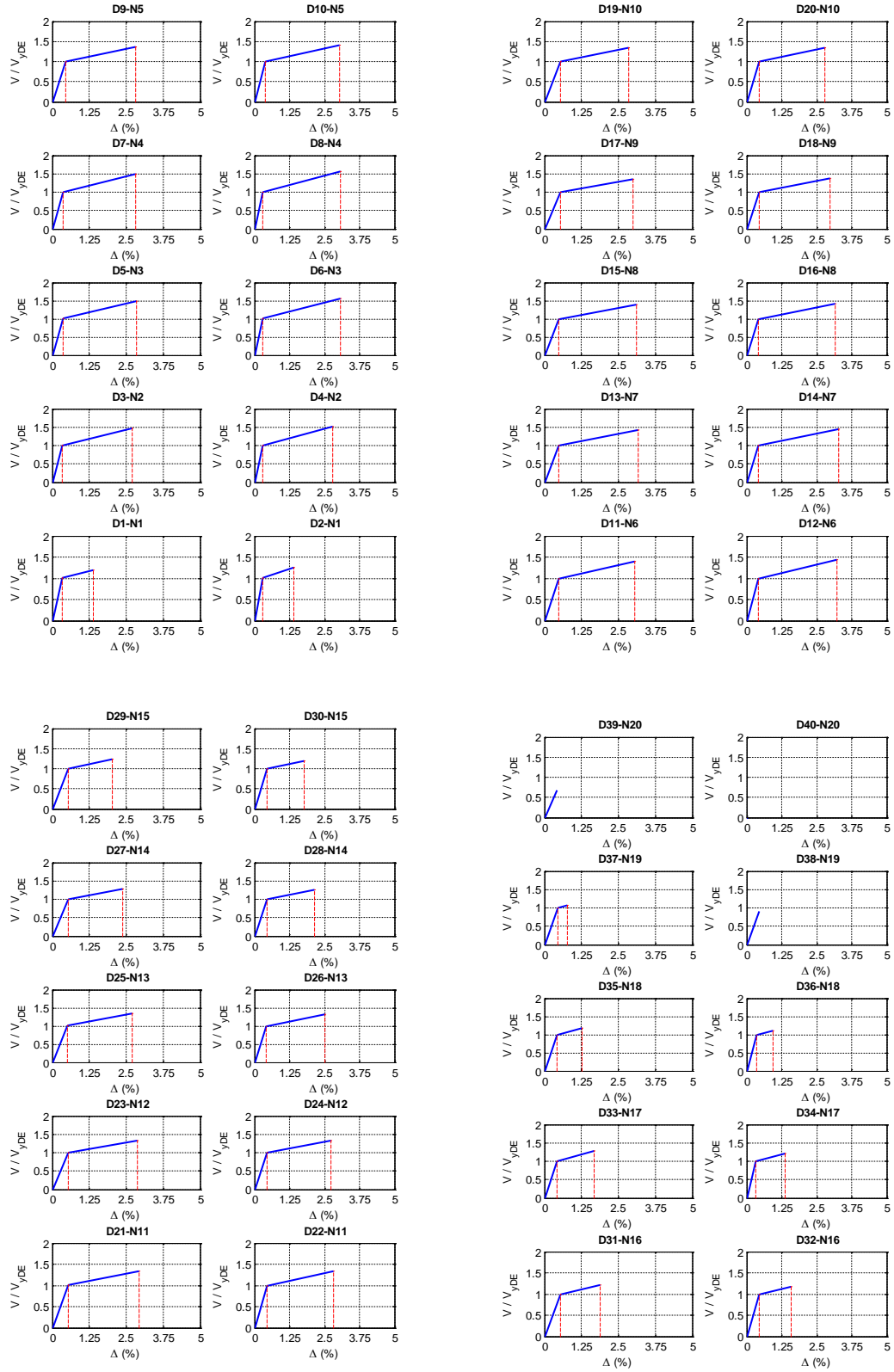


Figura A.243 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

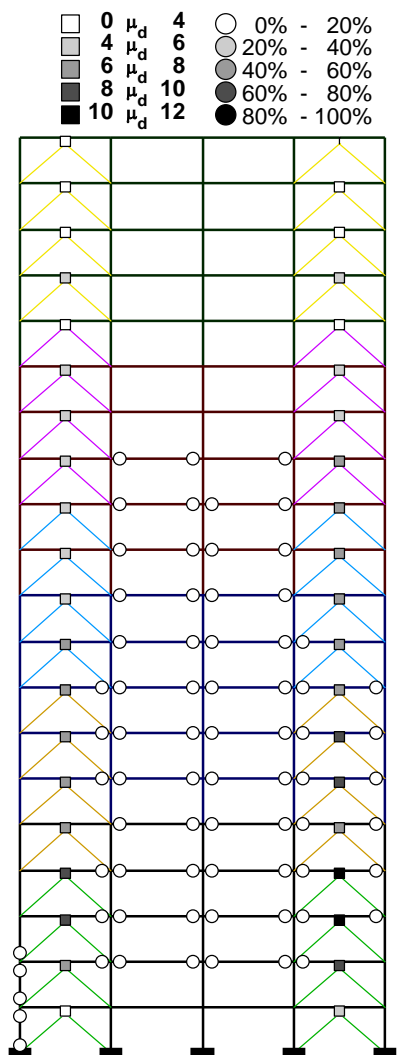
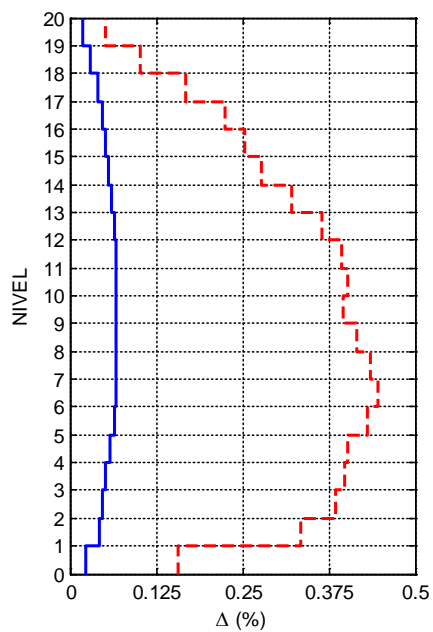
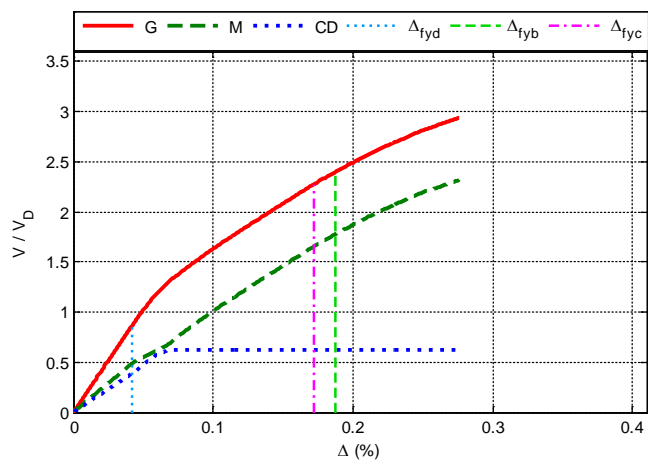


Figura A.244 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

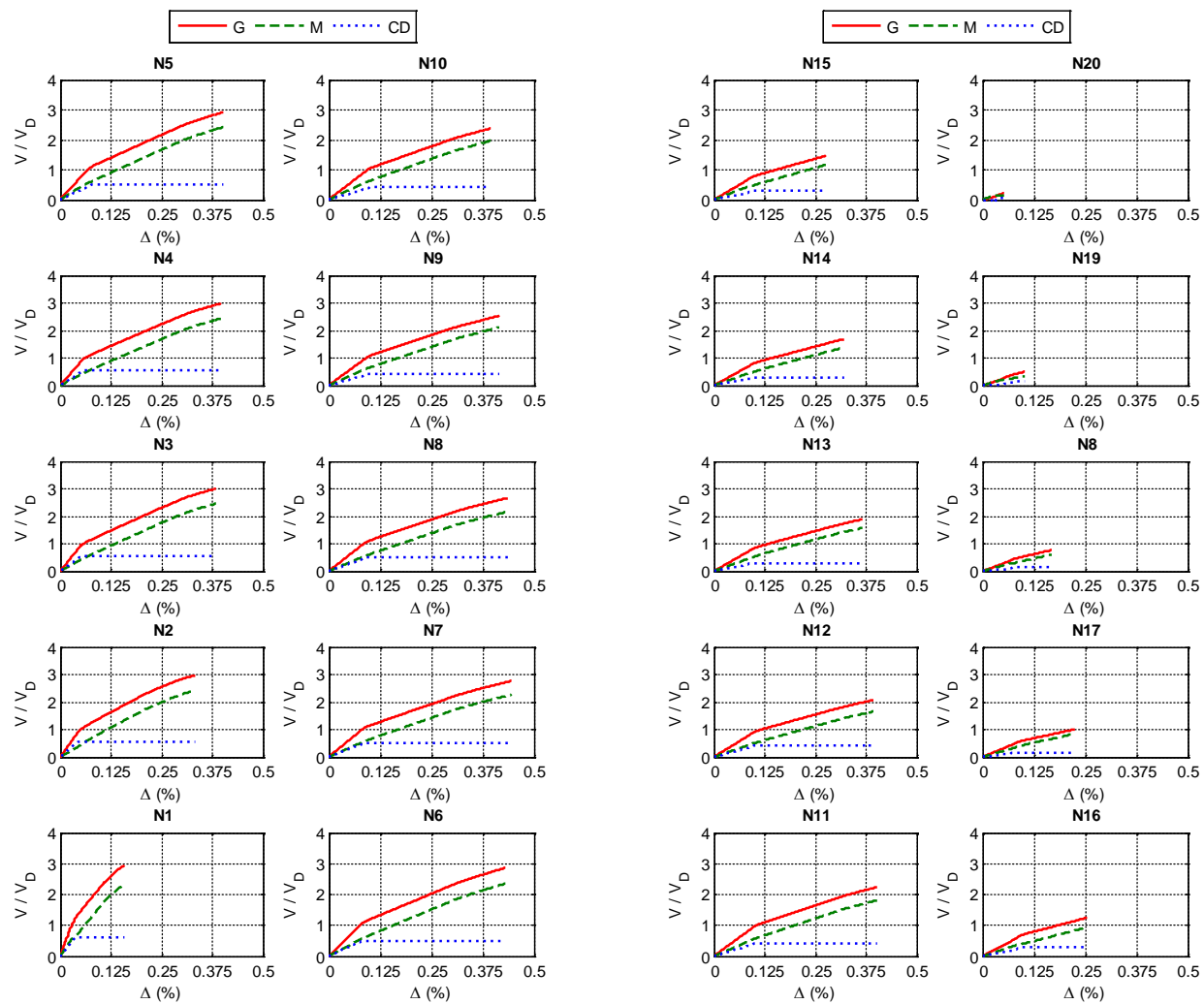


Figura A.245 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

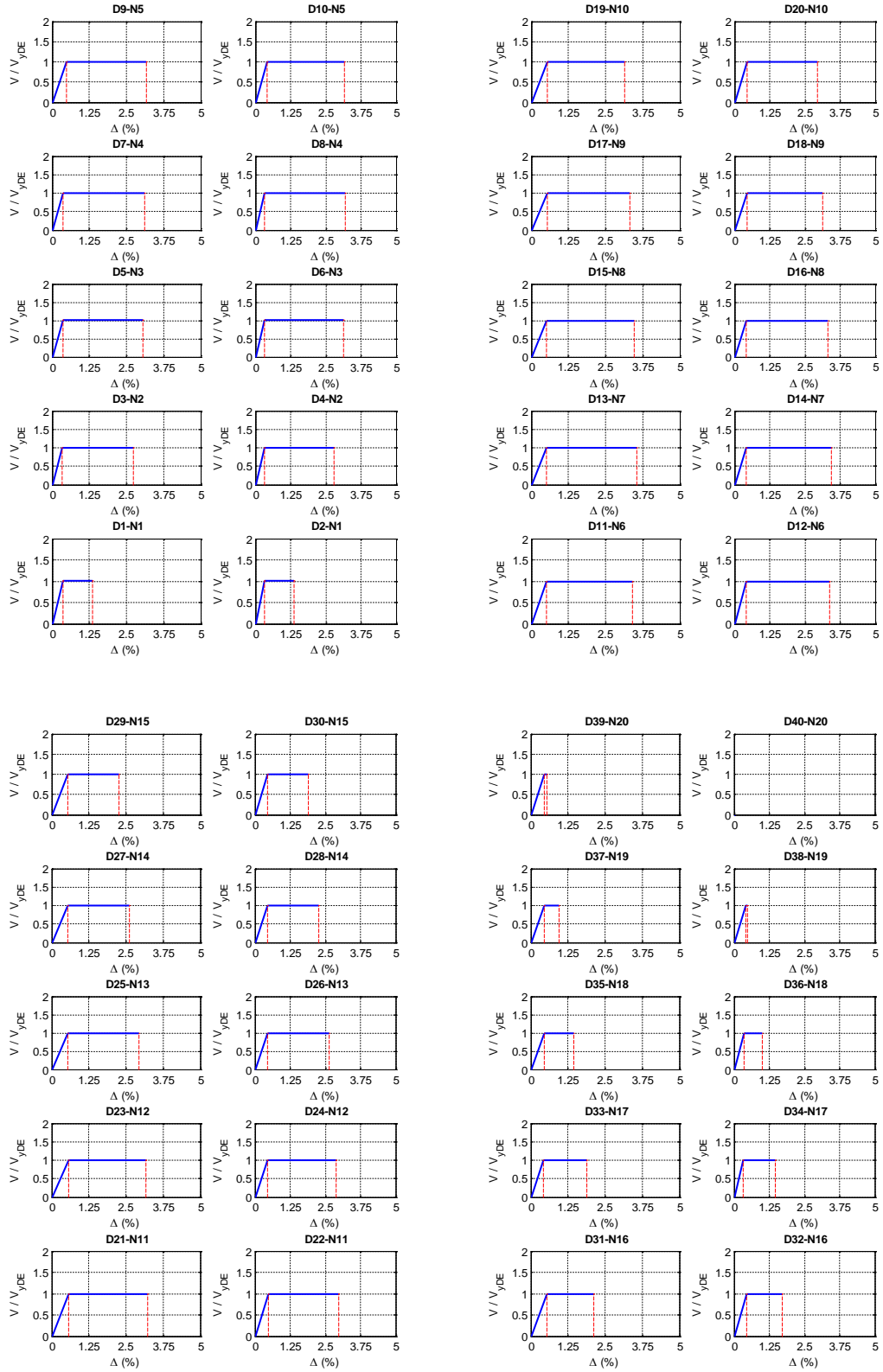


Figura A.246 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

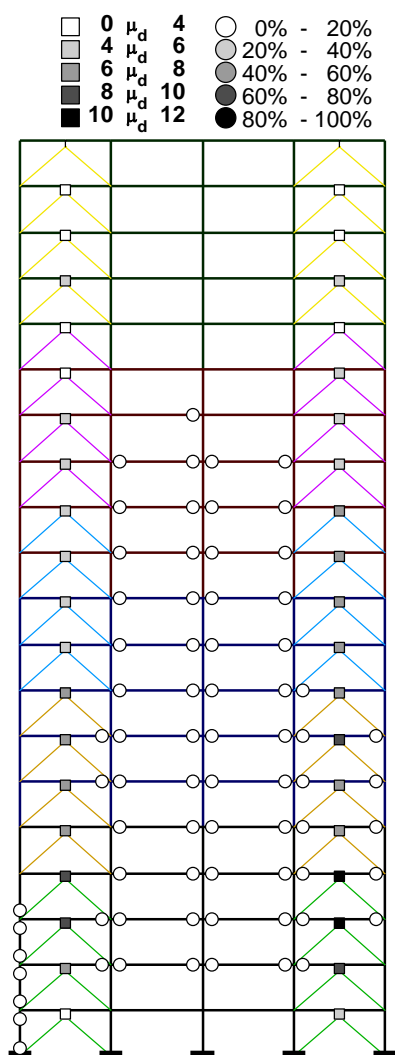
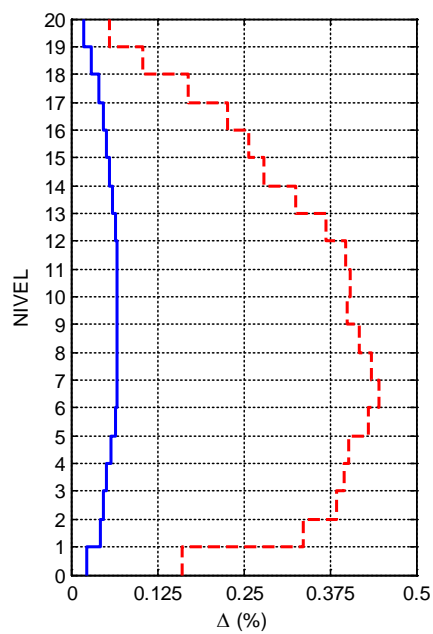
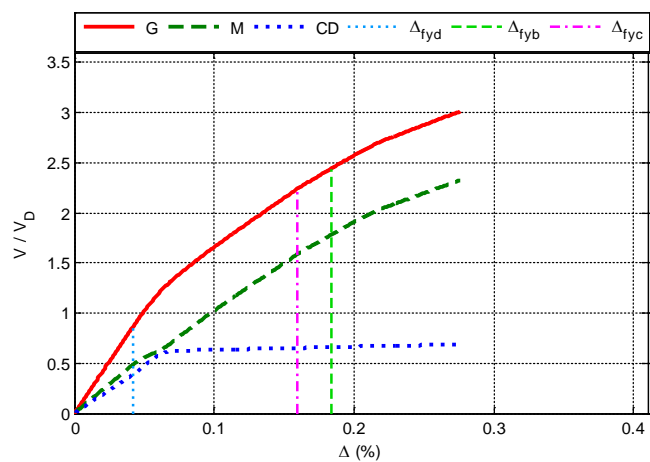


Figura A.247 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

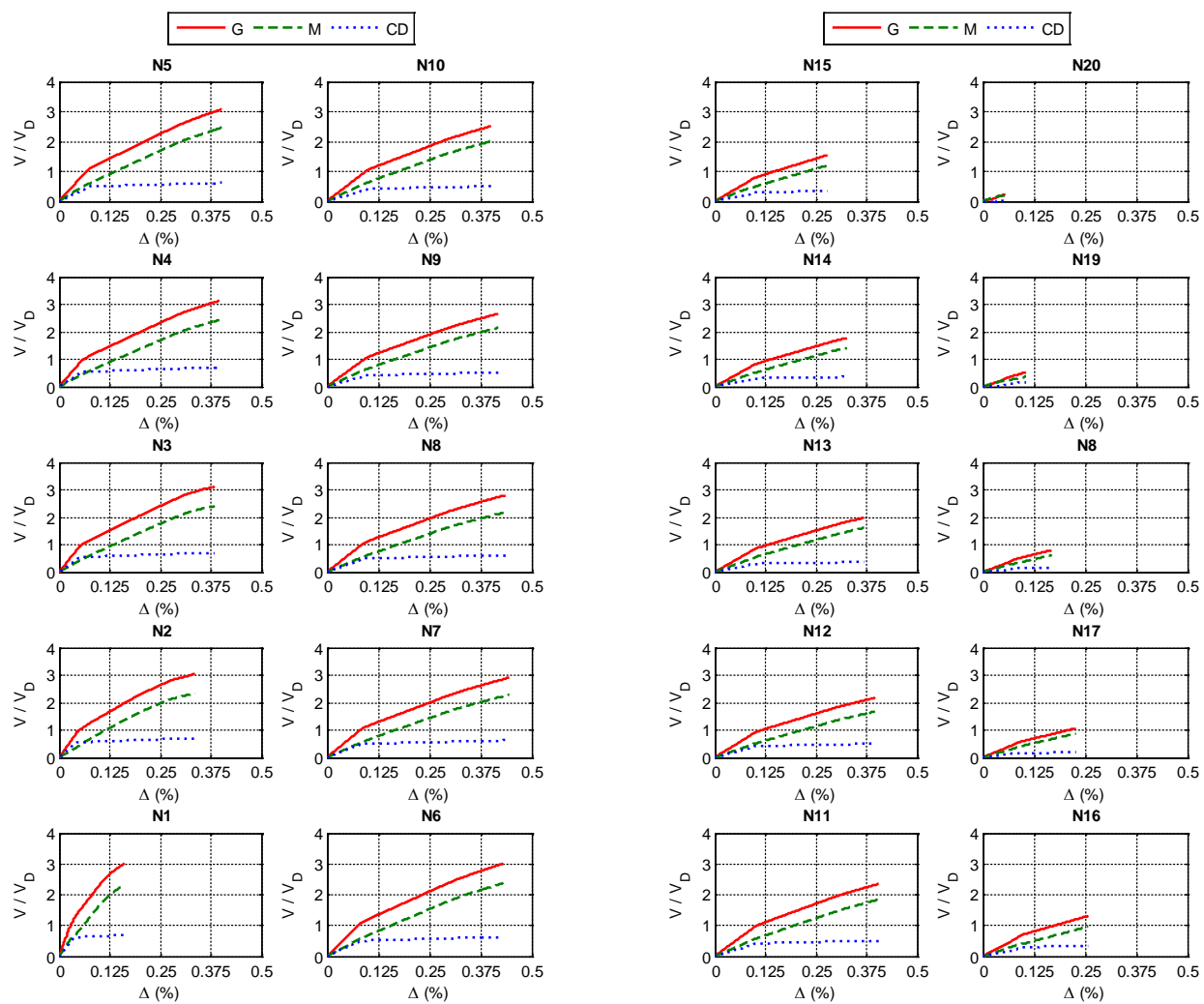


Figura A.248 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

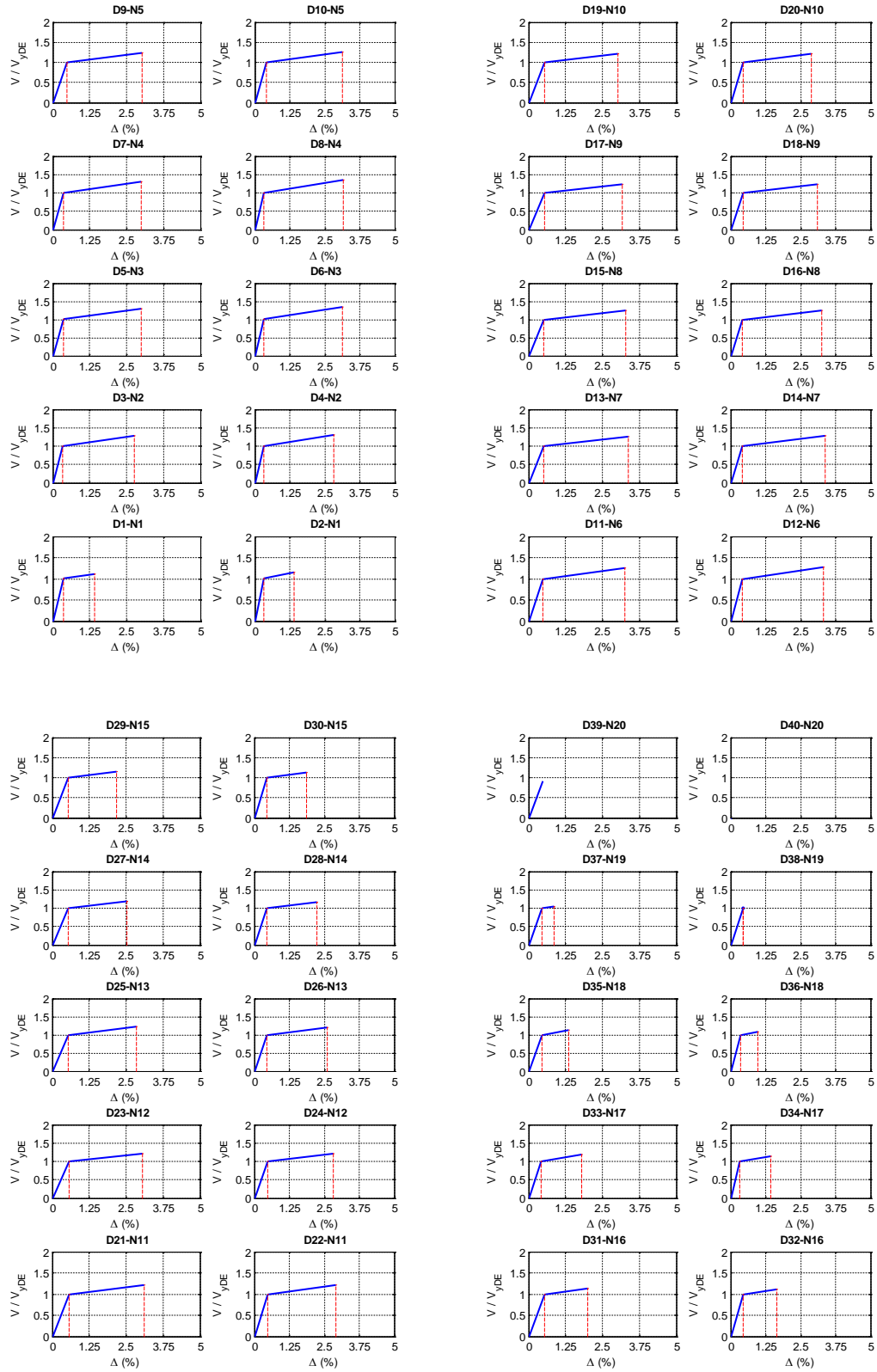


Figura A.249 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

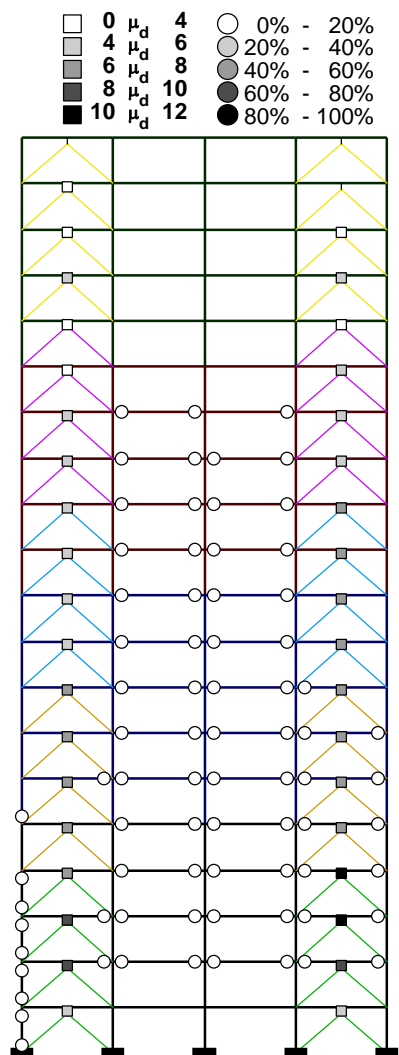
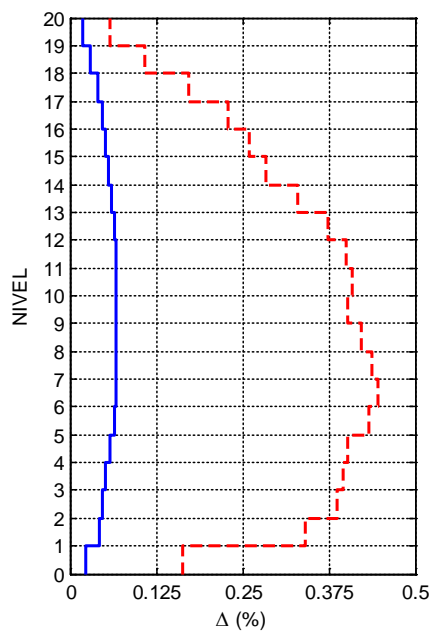
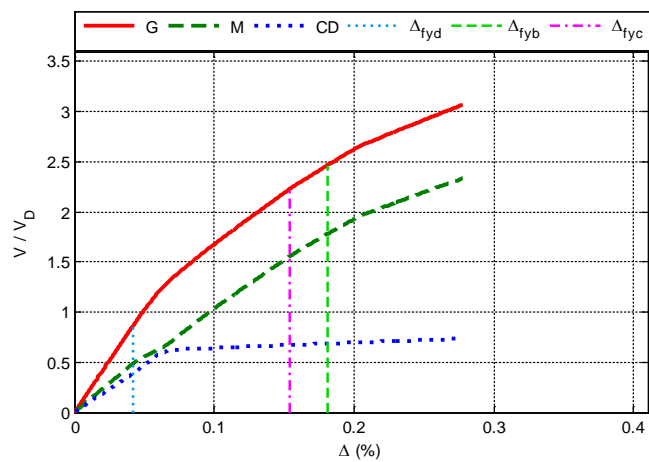


Figura A.250 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

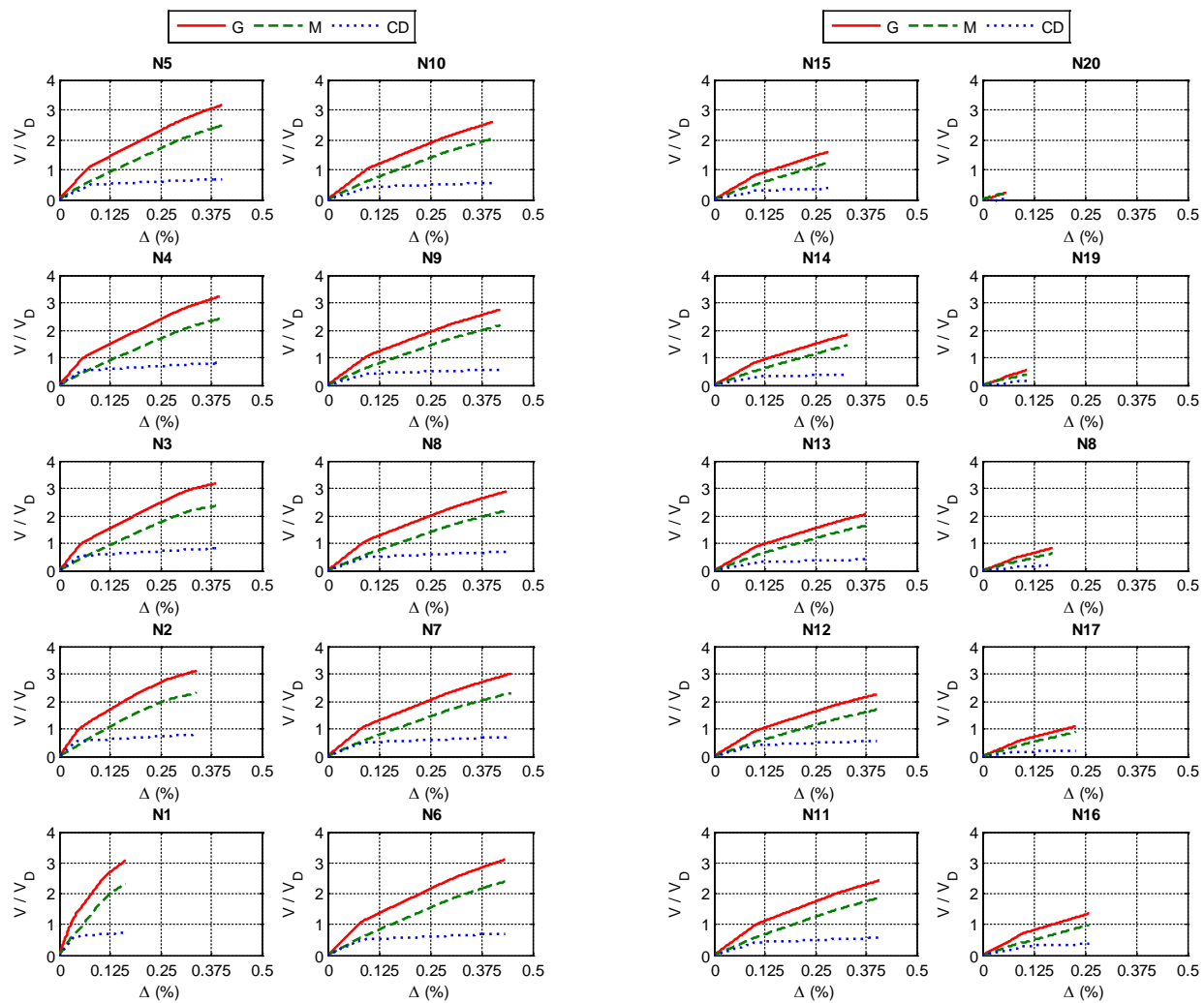


Figura A.251 $N = 20, \alpha = 0.5, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

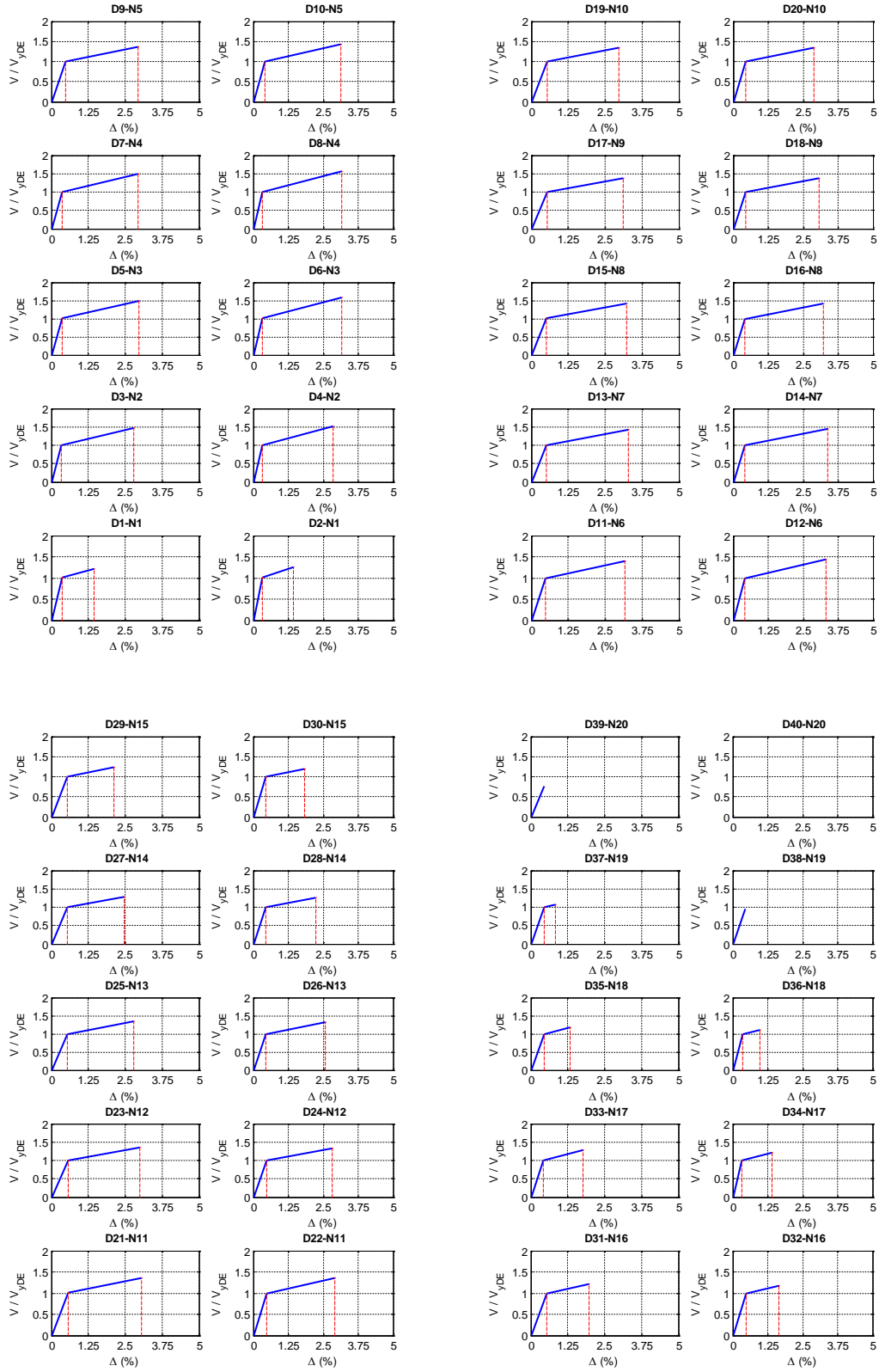


Figura A.252 $N = 20$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

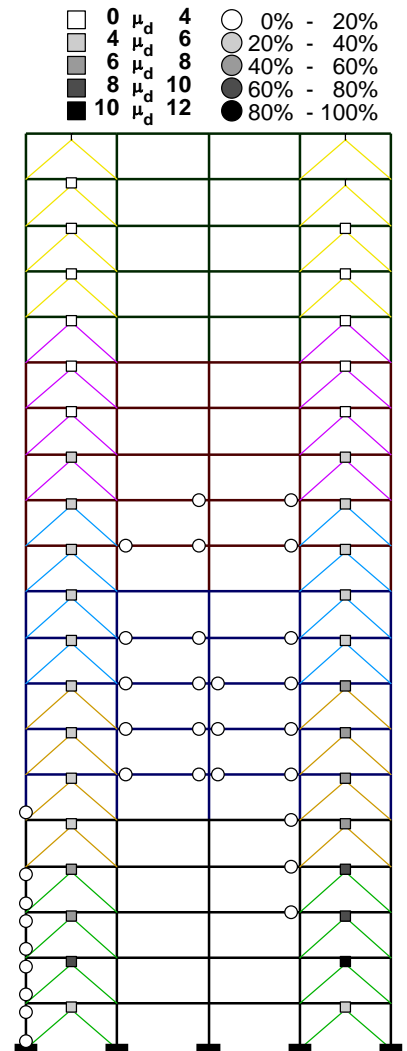
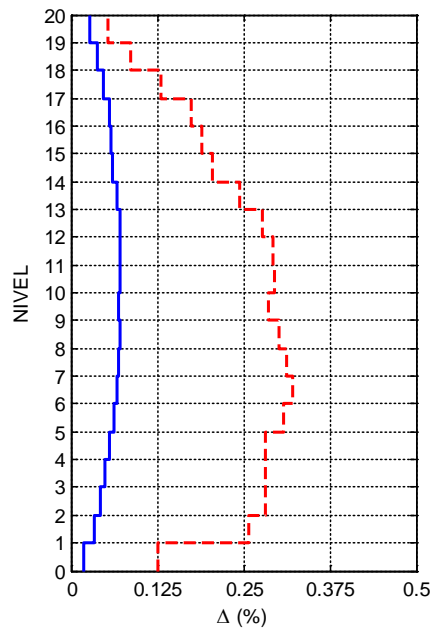
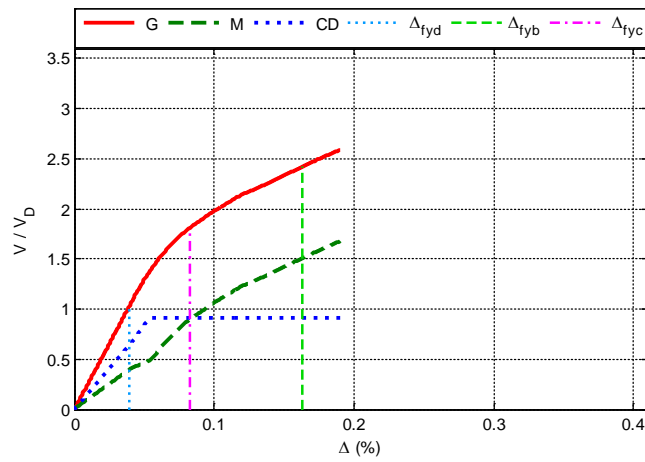


Figura A.253 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

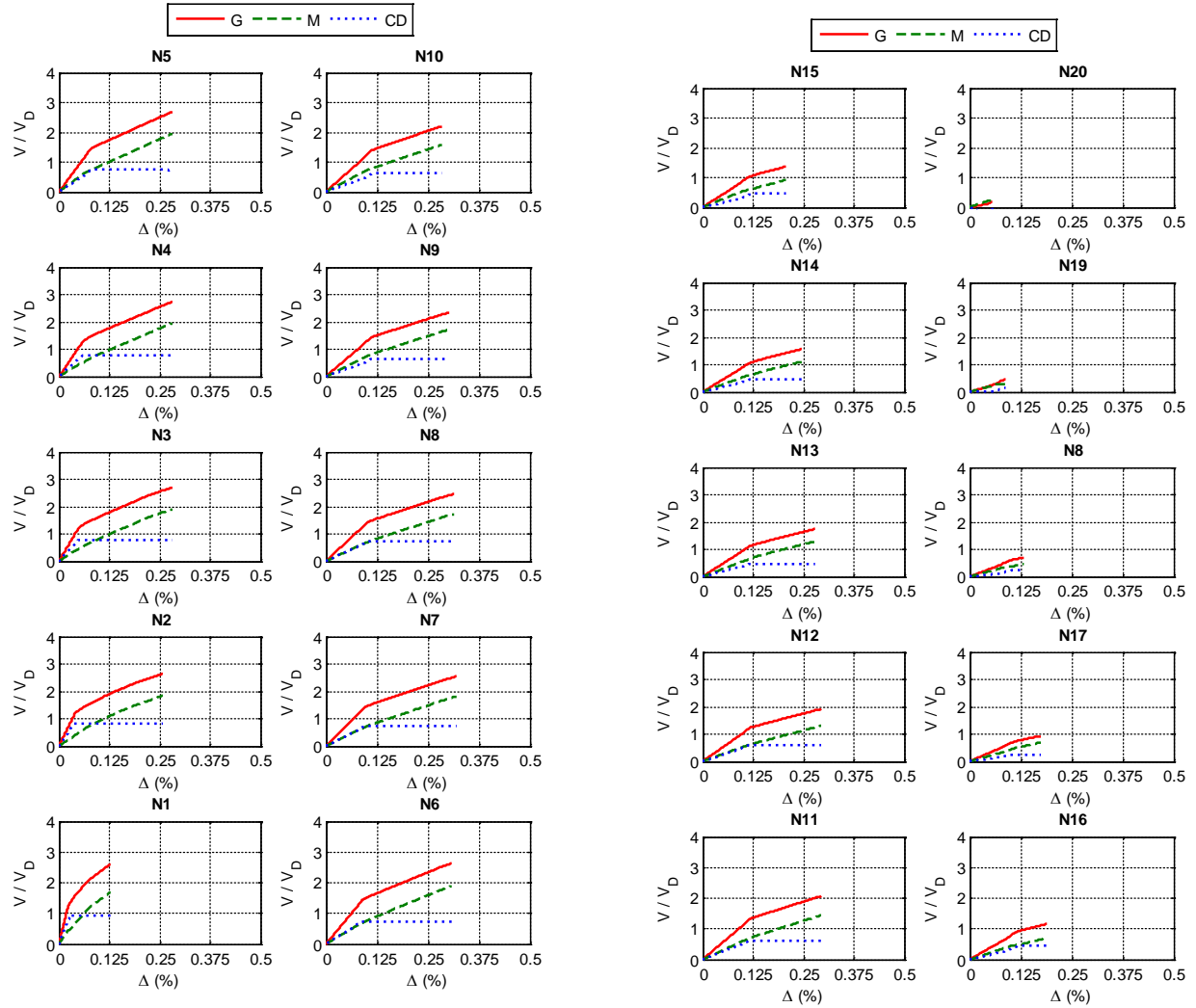


Figura A.254 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

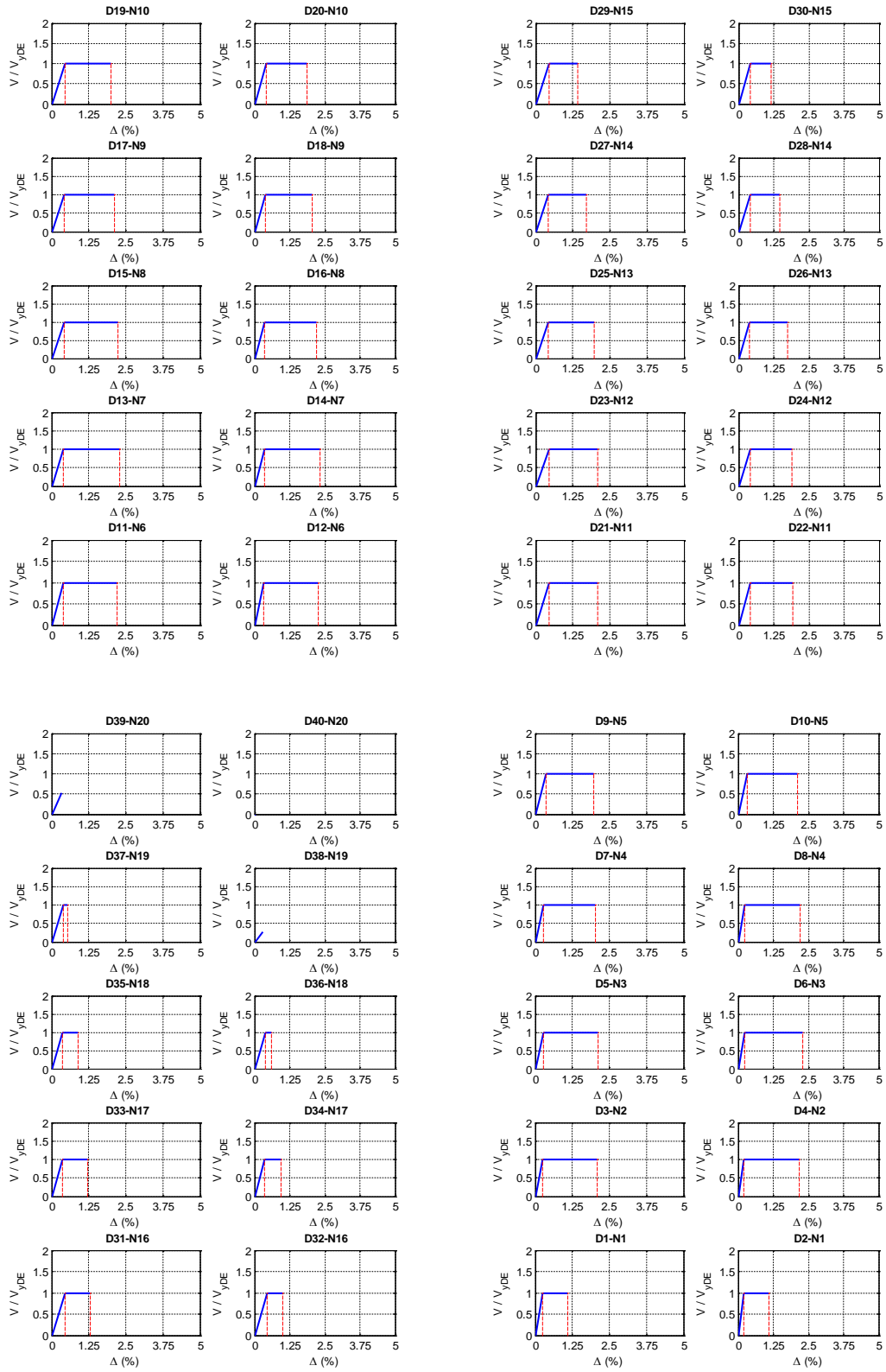


Figura A.255 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

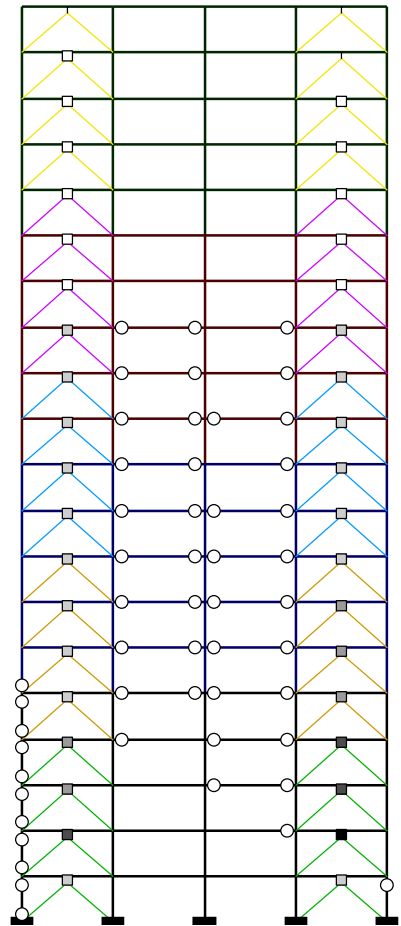
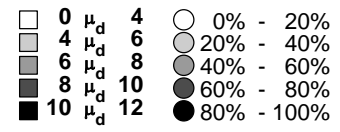
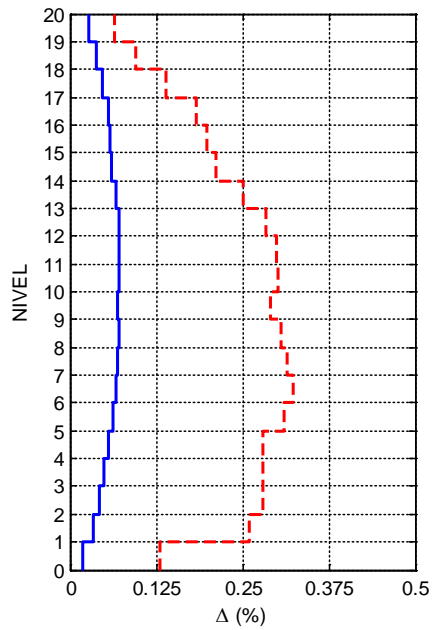
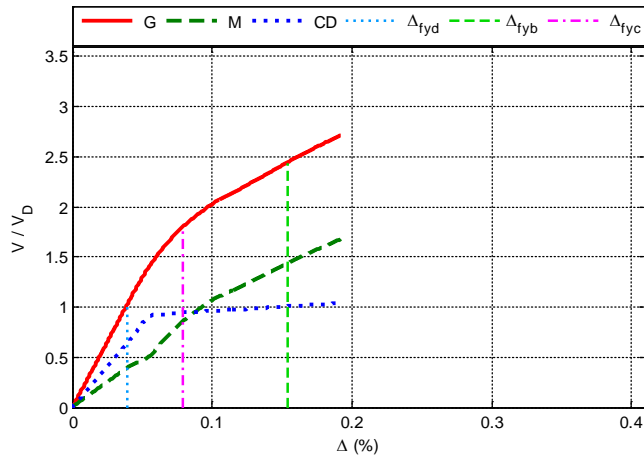


Figura A.256 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

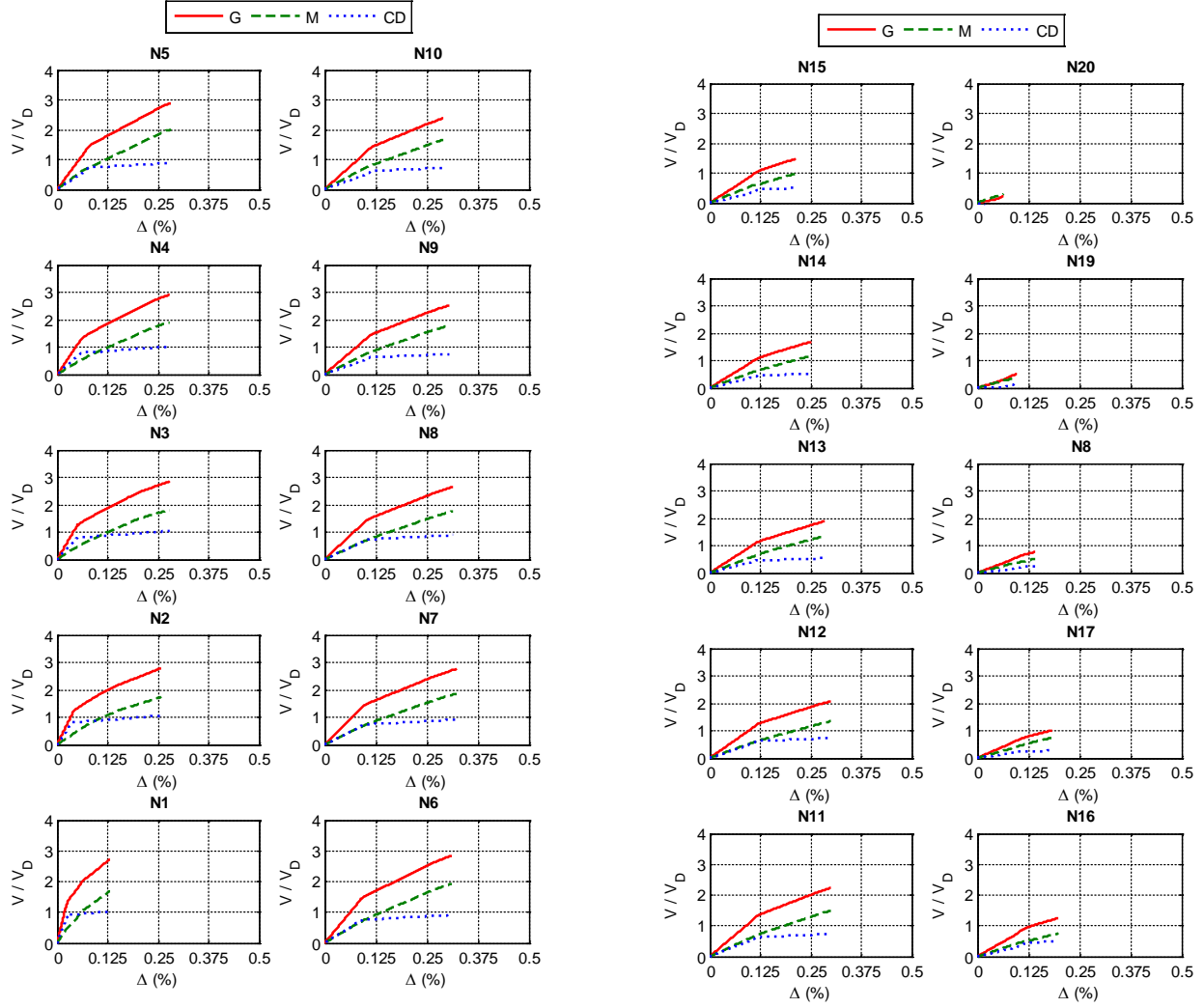


Figura A.257 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

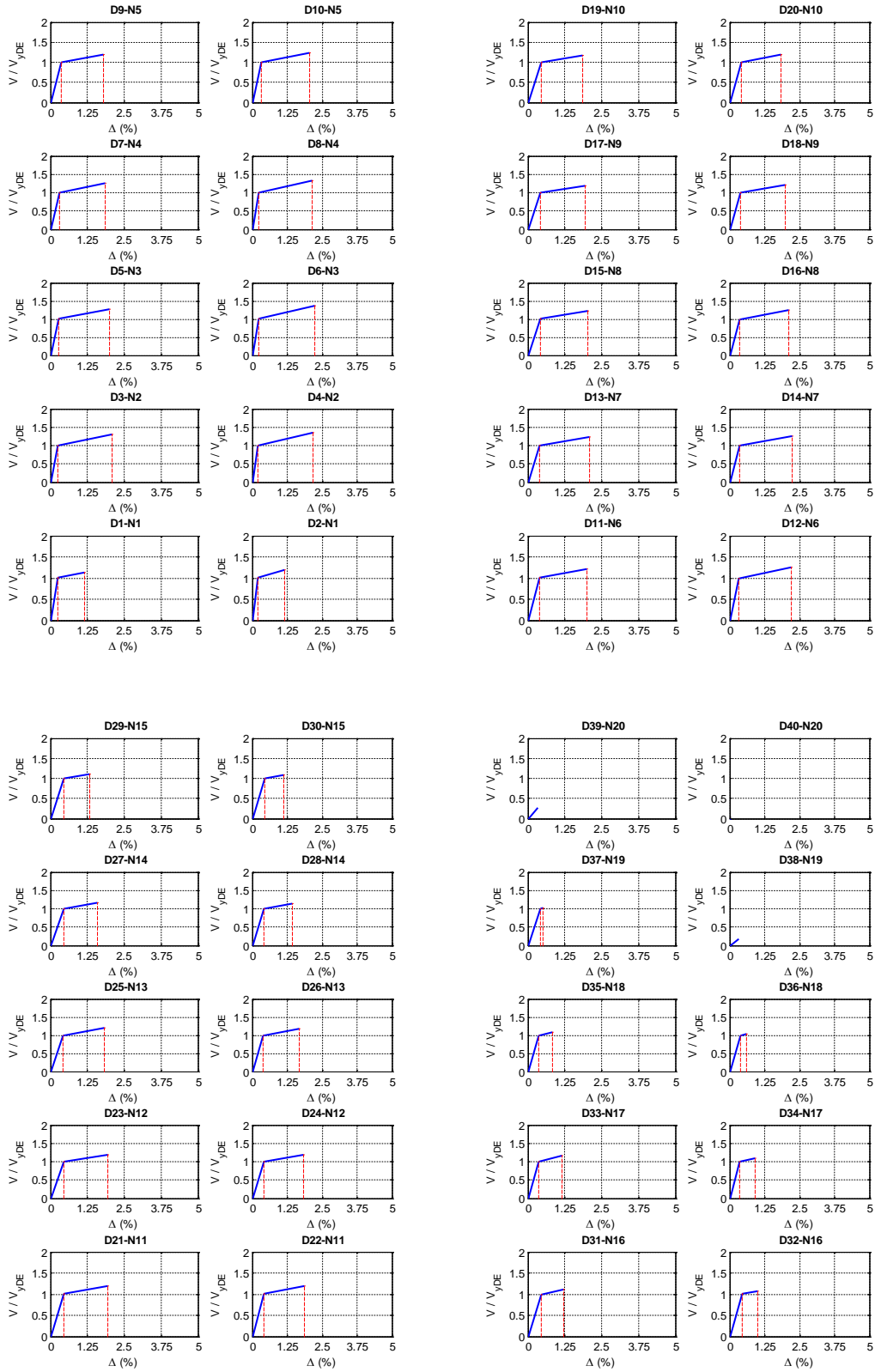


Figura A.258 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

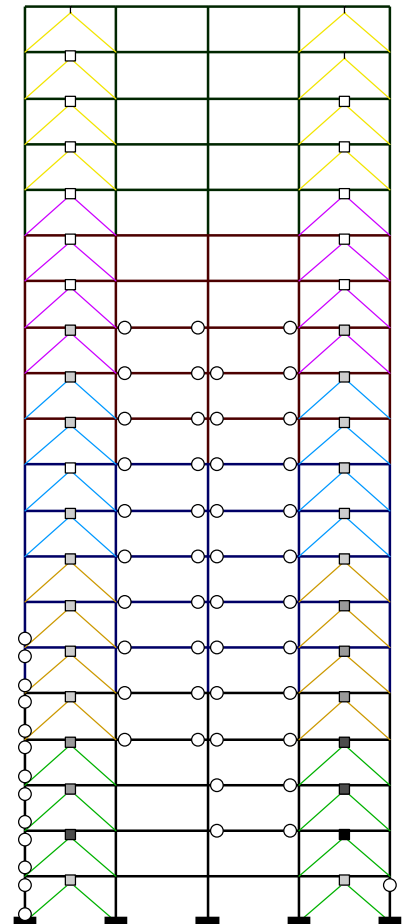
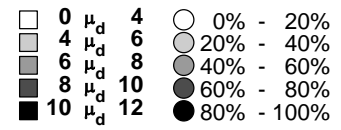
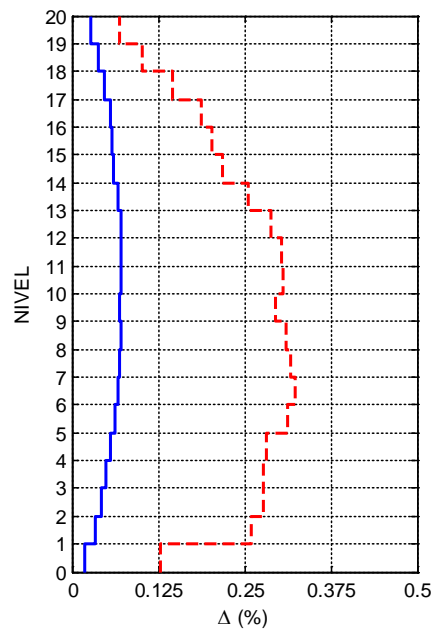
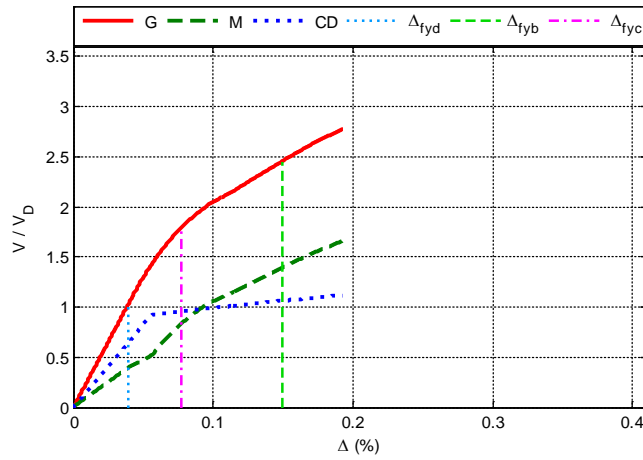


Figura A.259 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

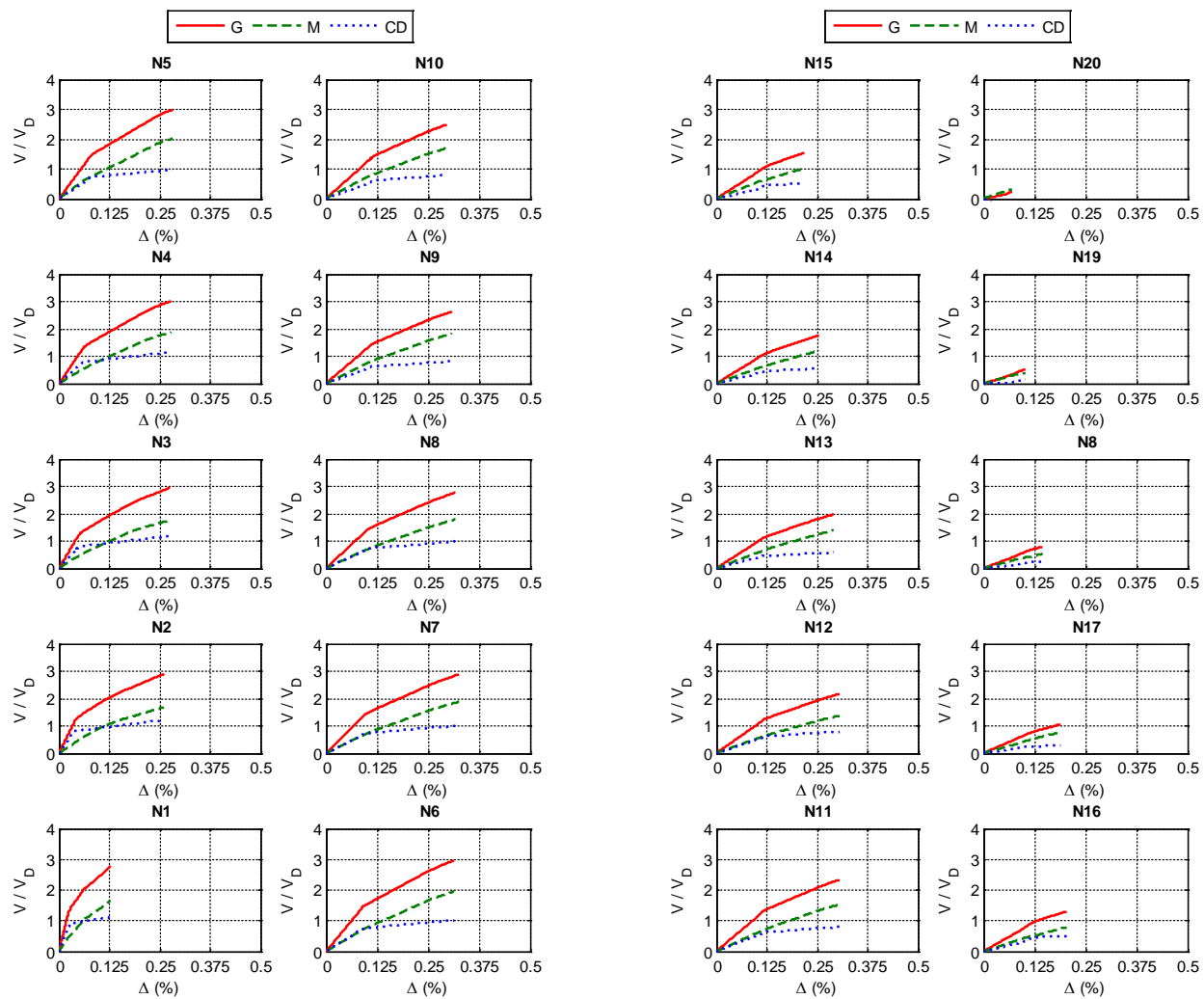


Figura A.260 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

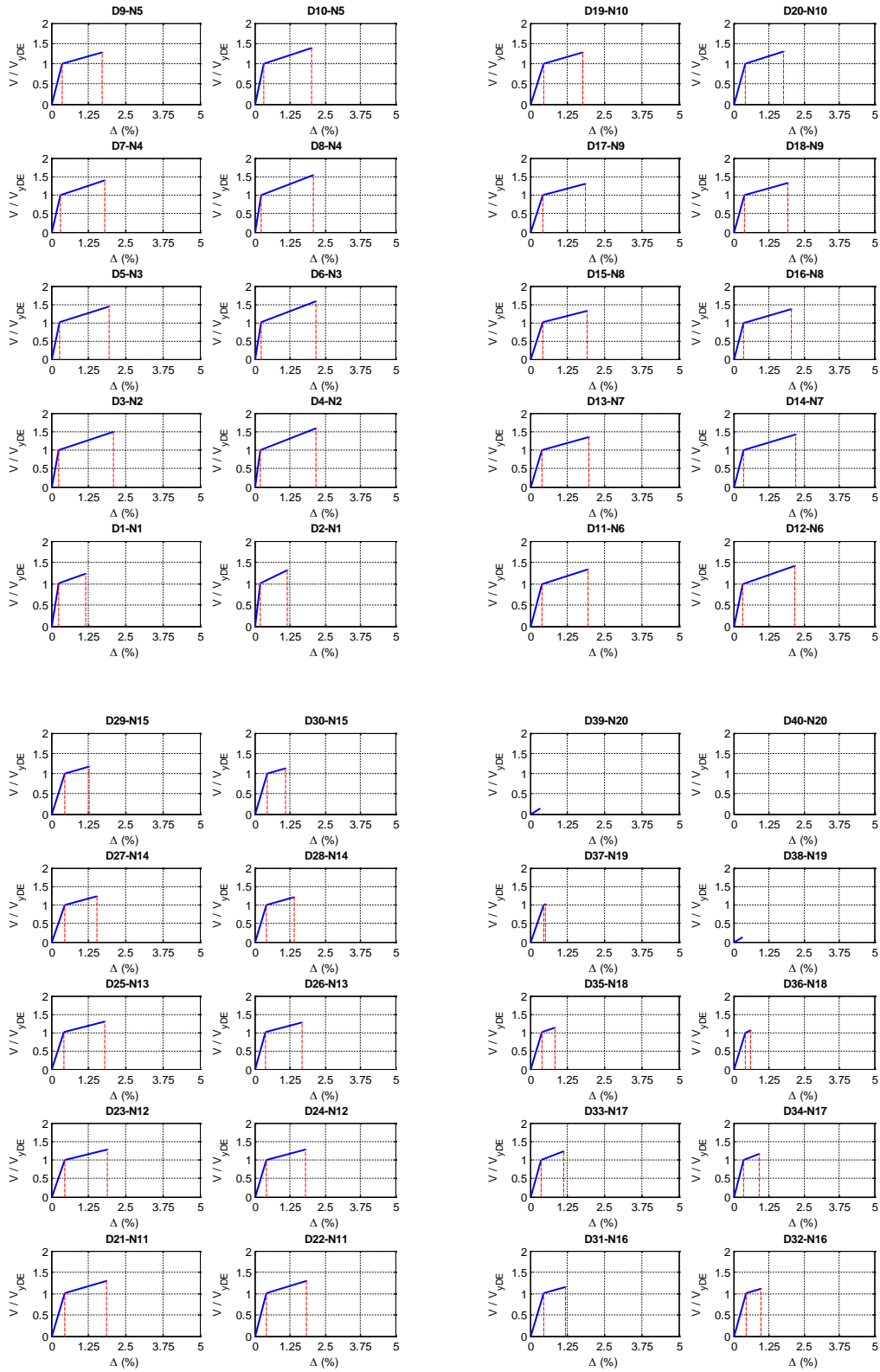


Figura A.261 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

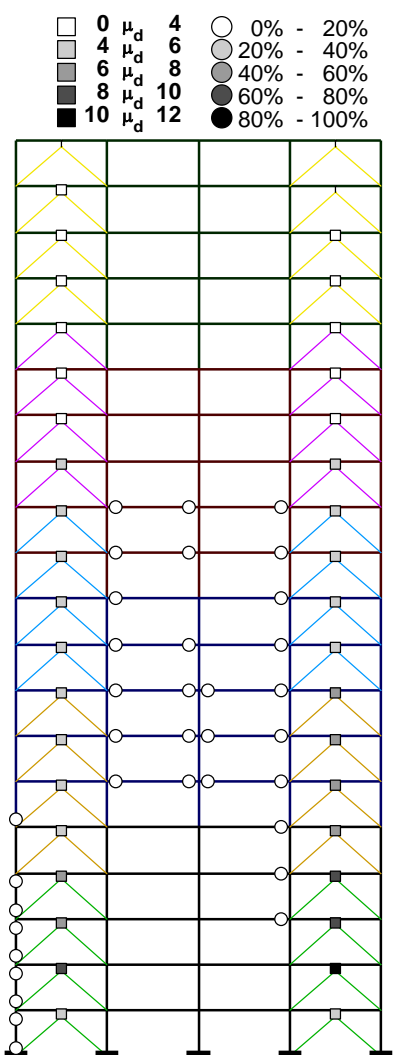
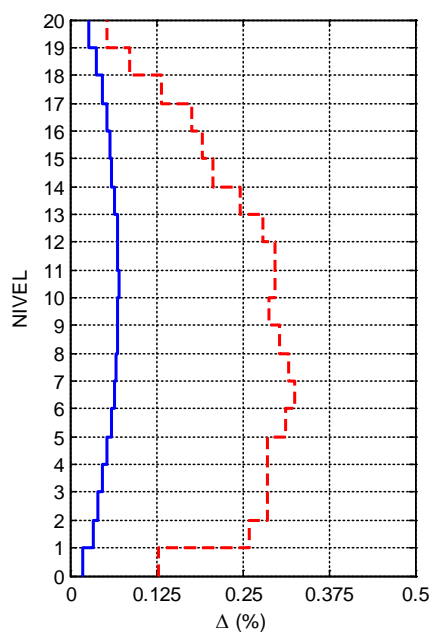
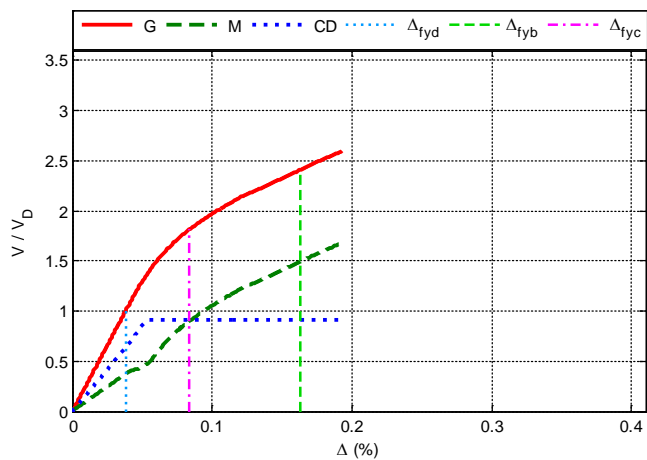


Figura A.262 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

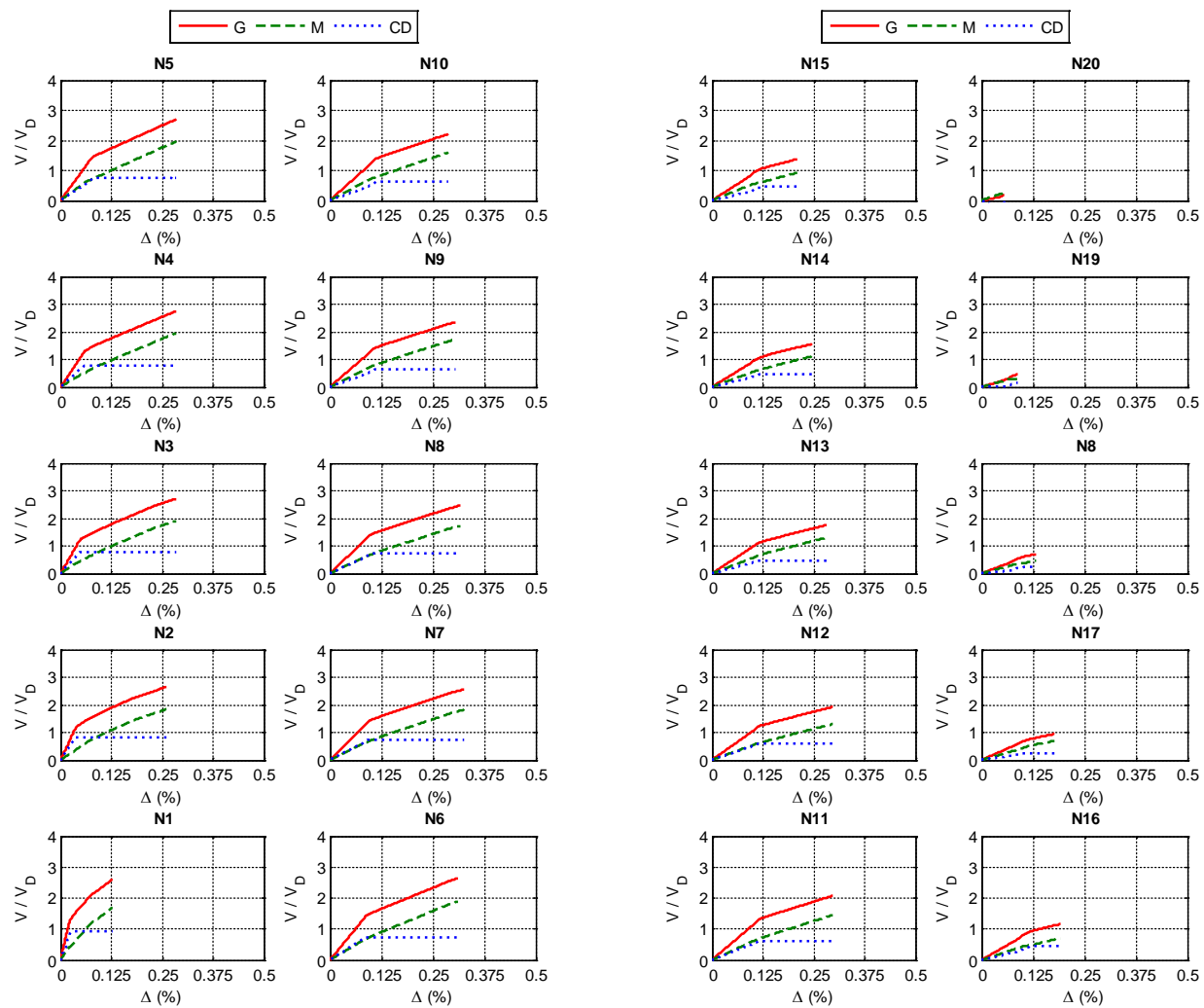


Figura A.263 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

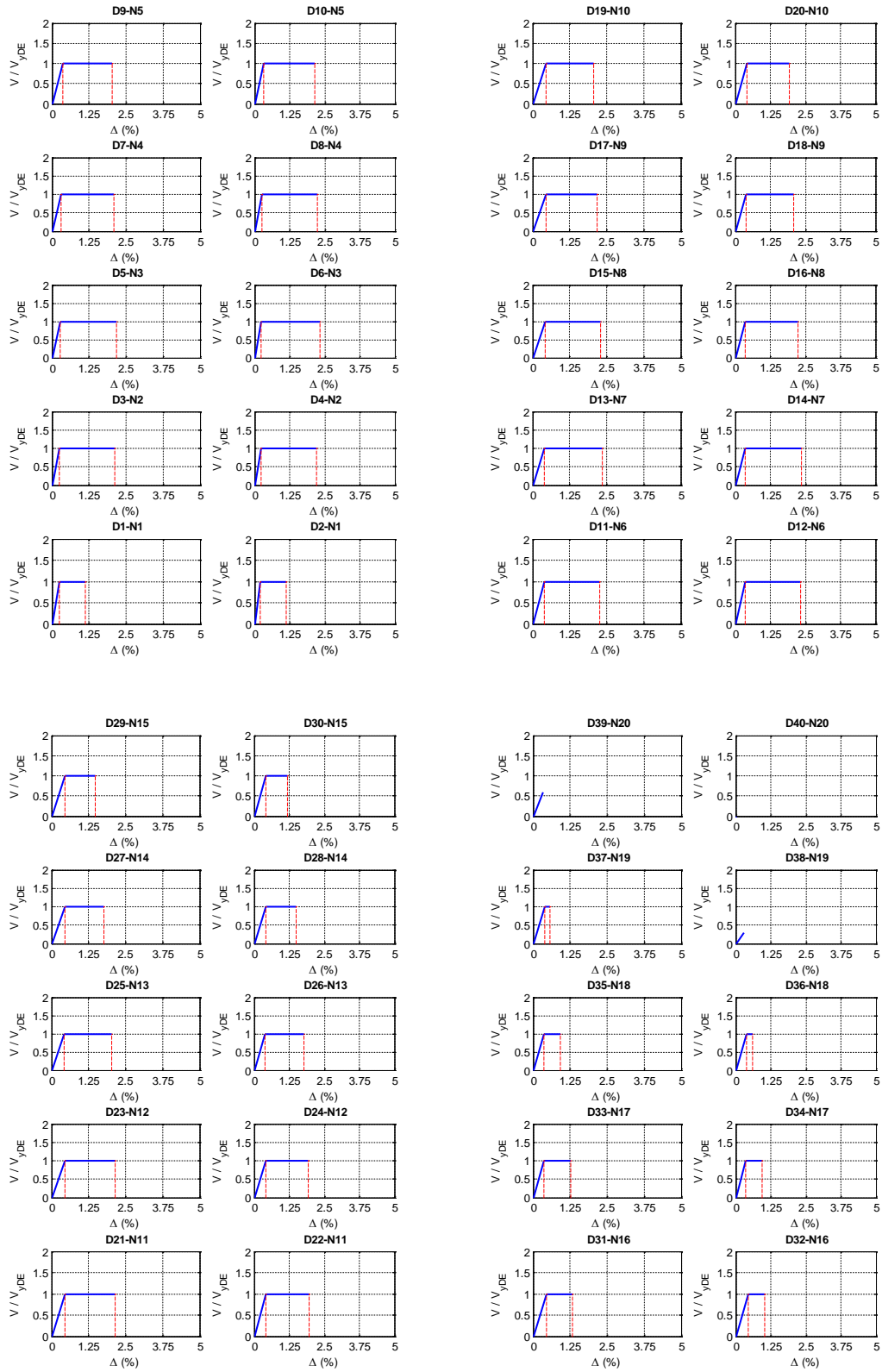


Figura A.264 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

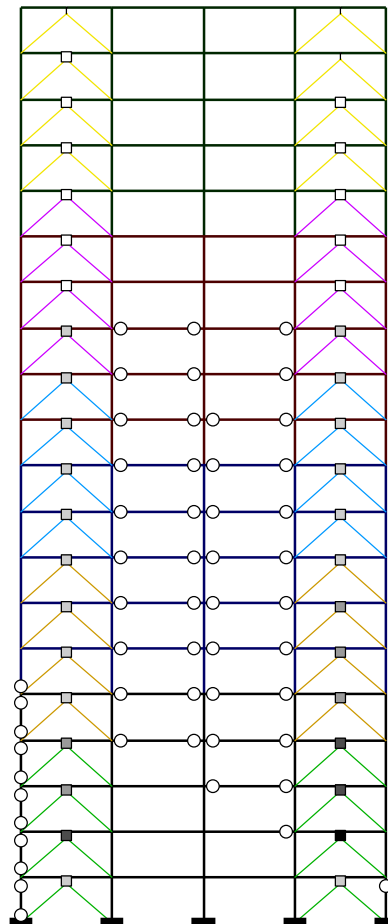
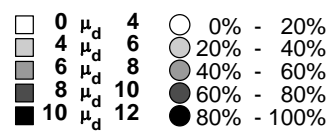
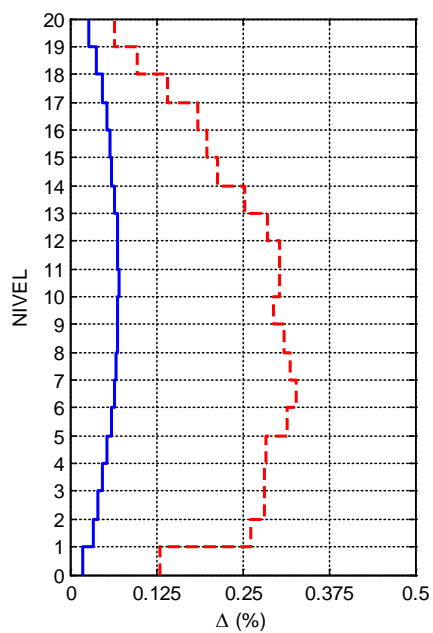
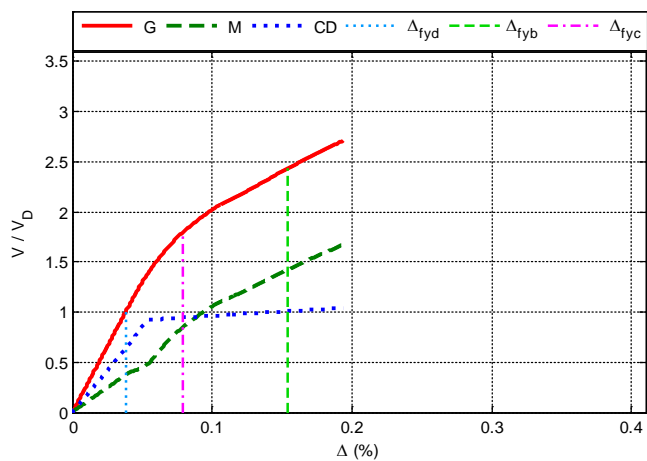


Figura A.265 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

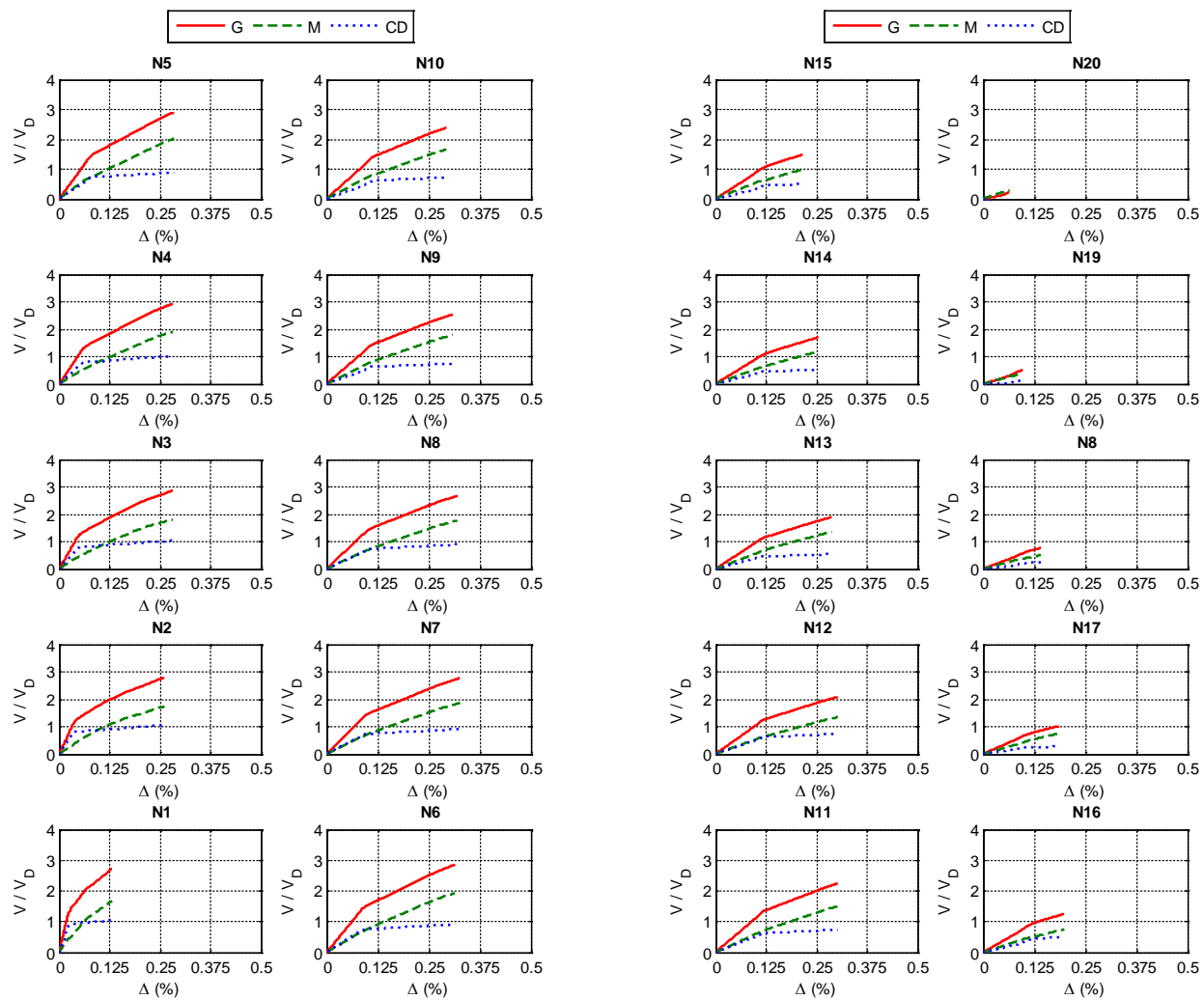


Figura A.266 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

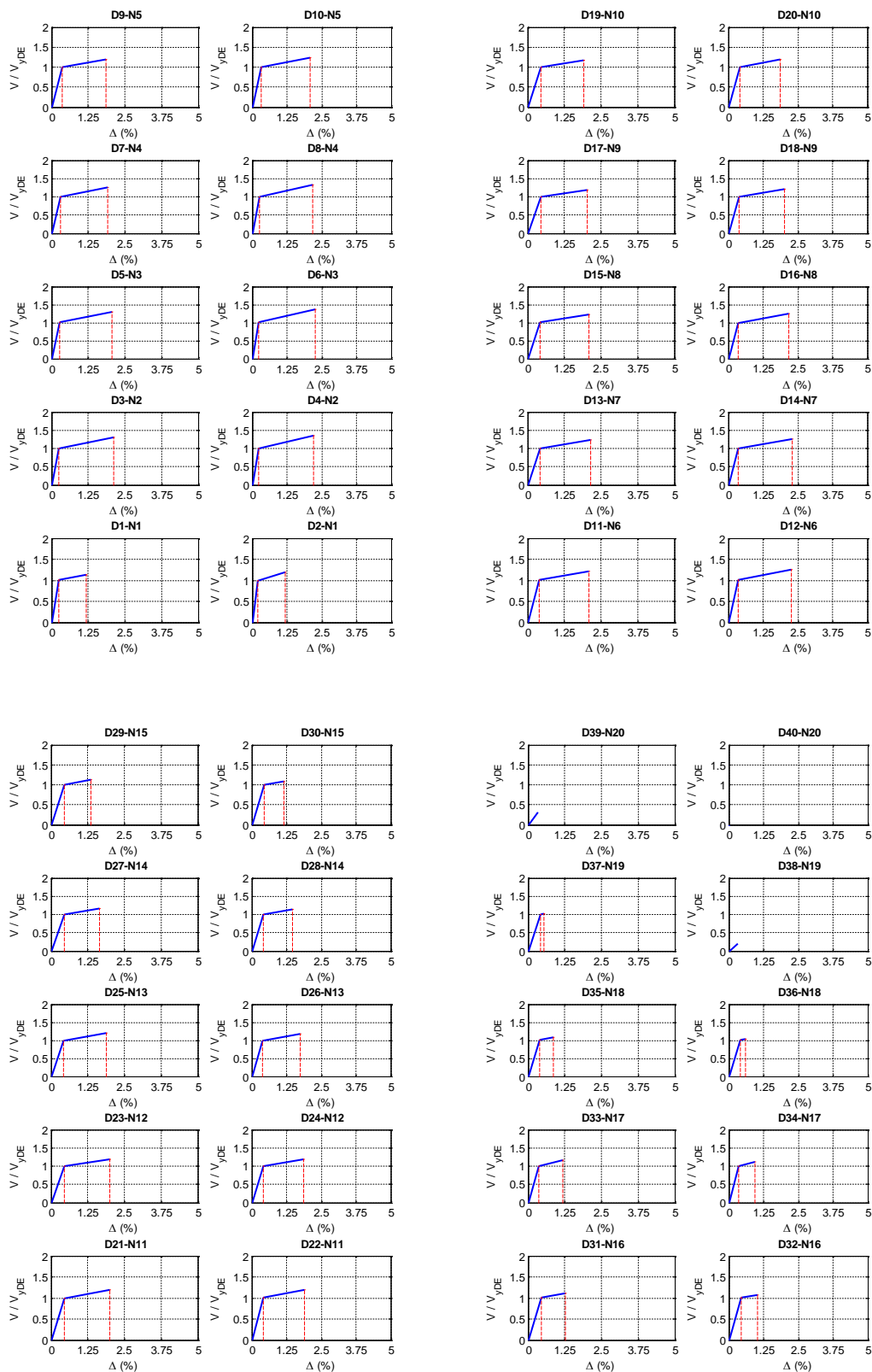


Figura A.267 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

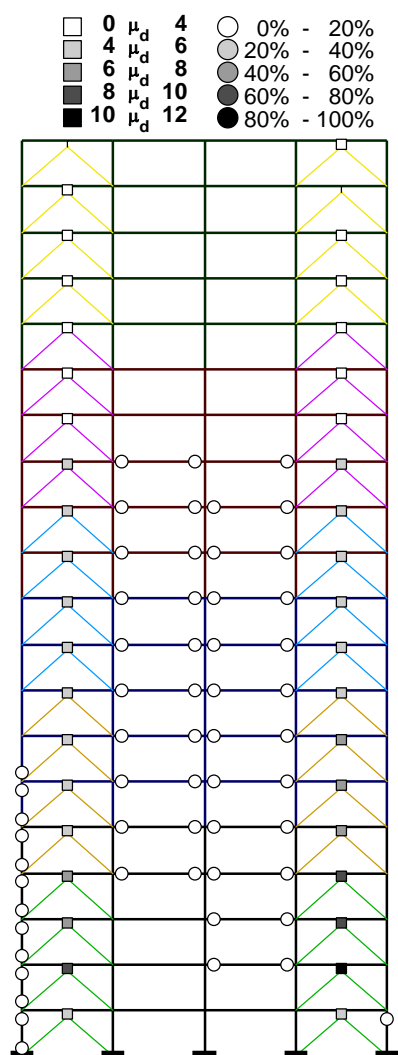
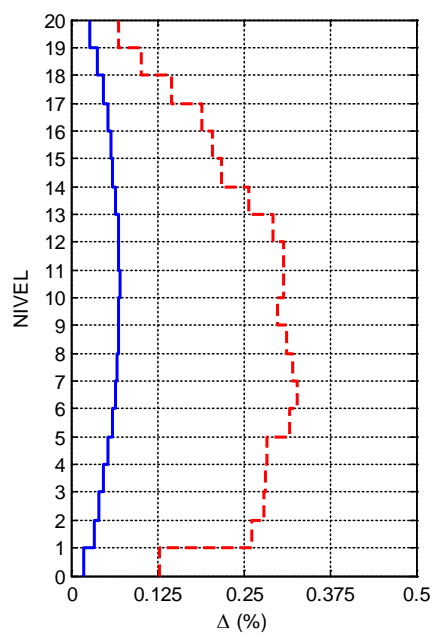
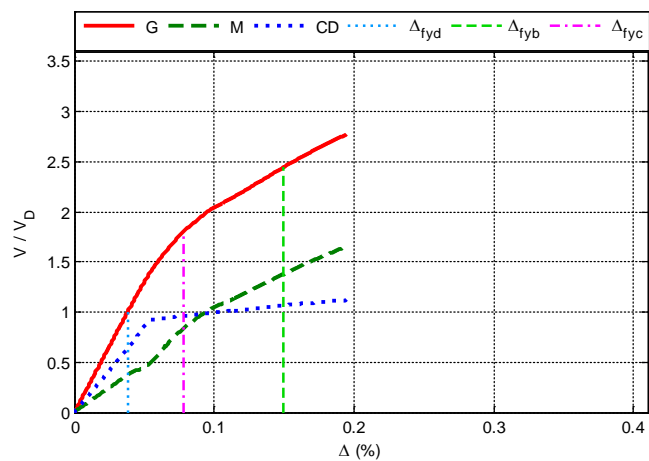


Figura A.268 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

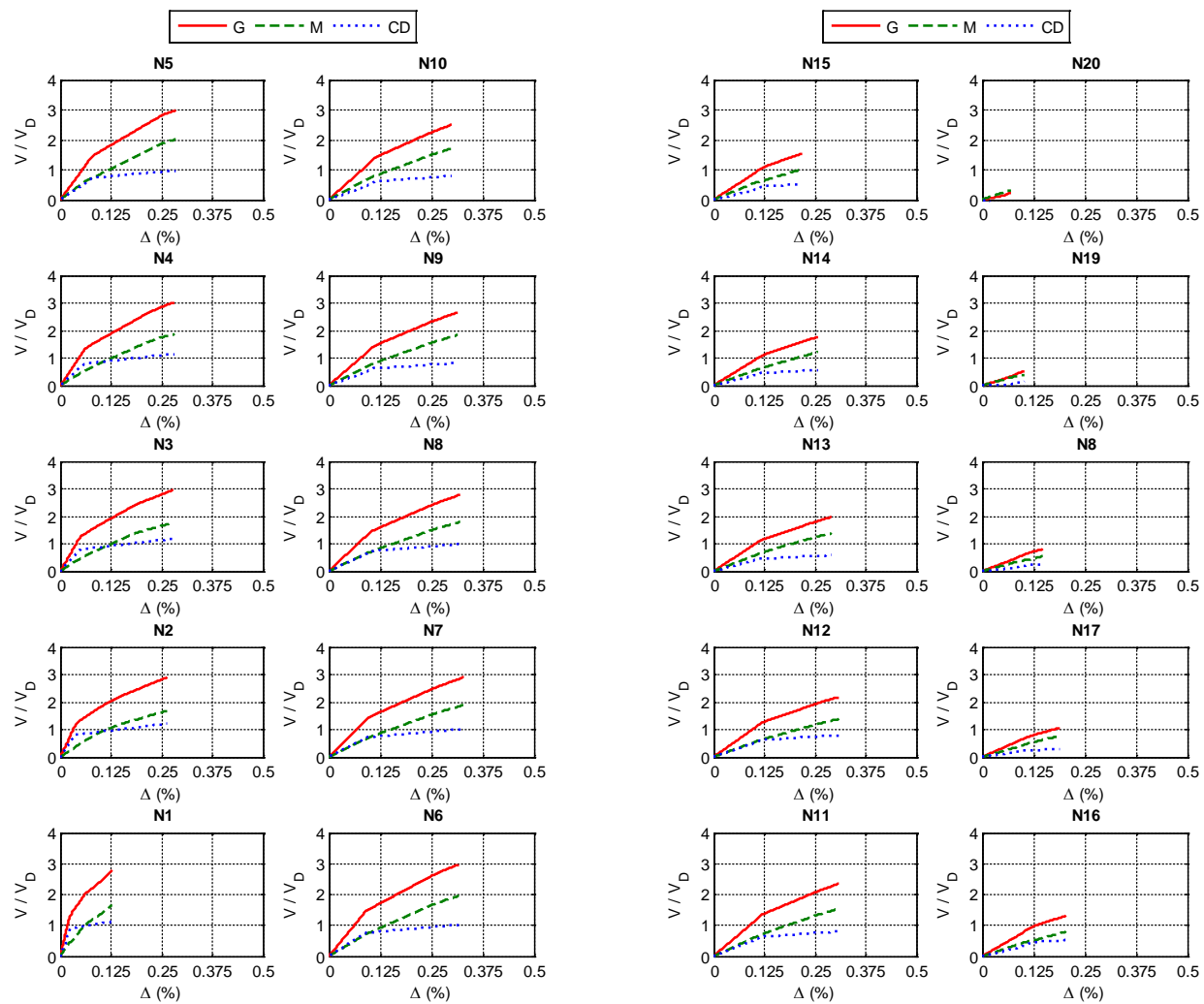


Figura A.269 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

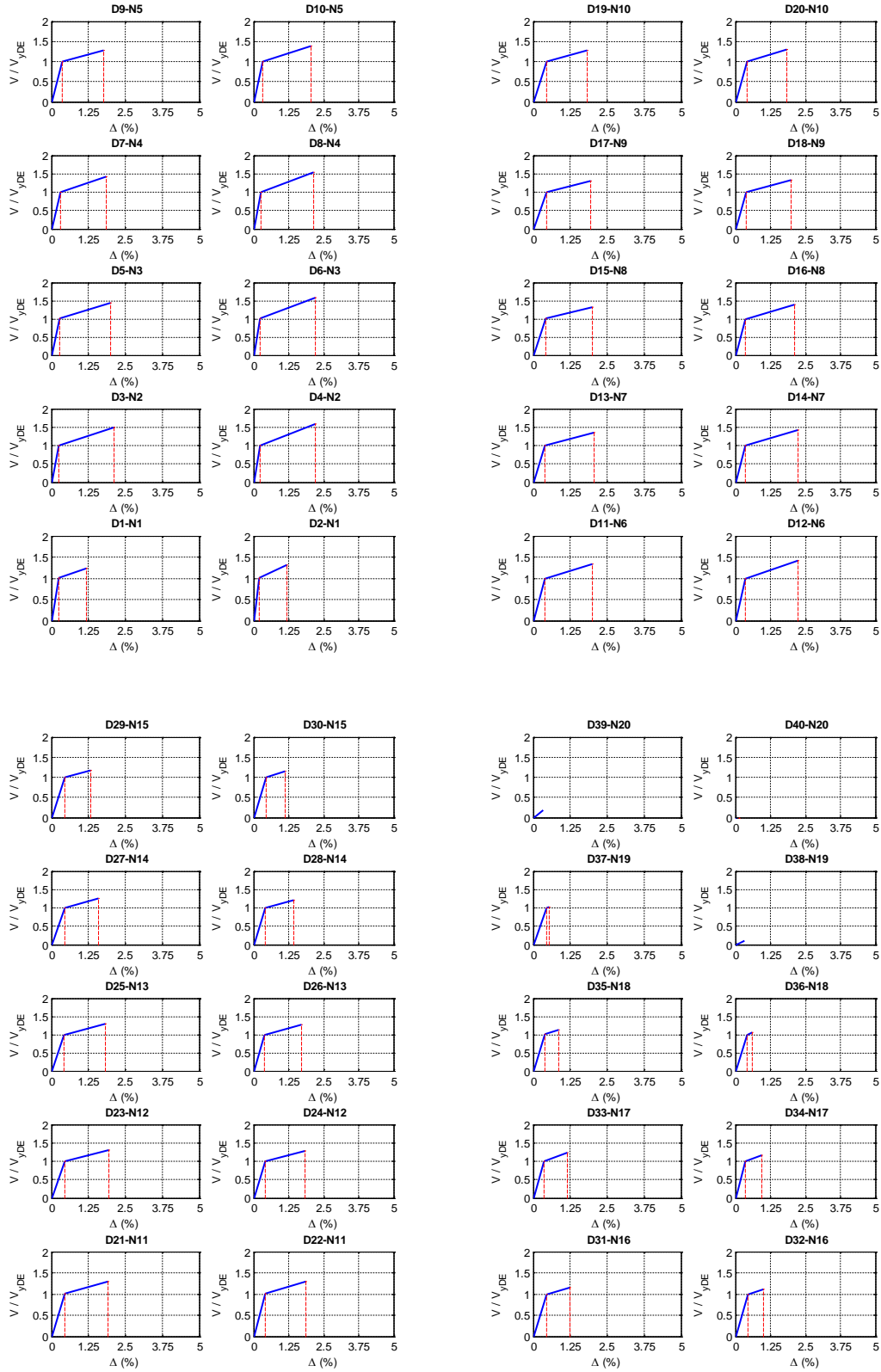


Figura A.270 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

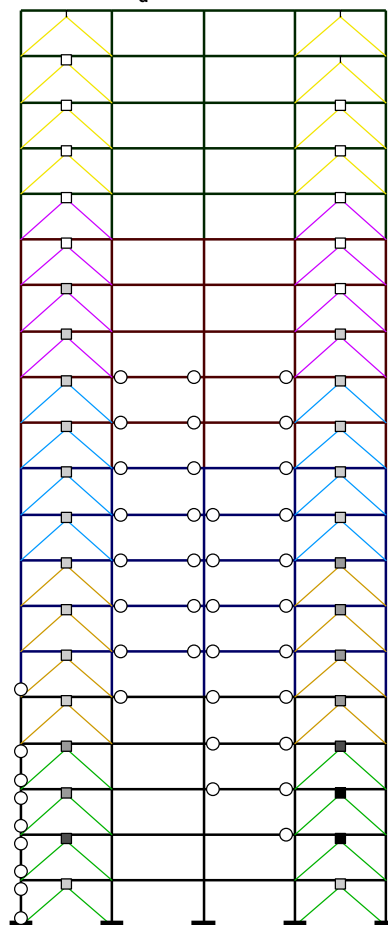
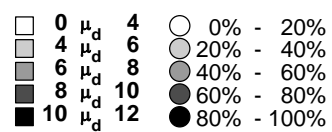
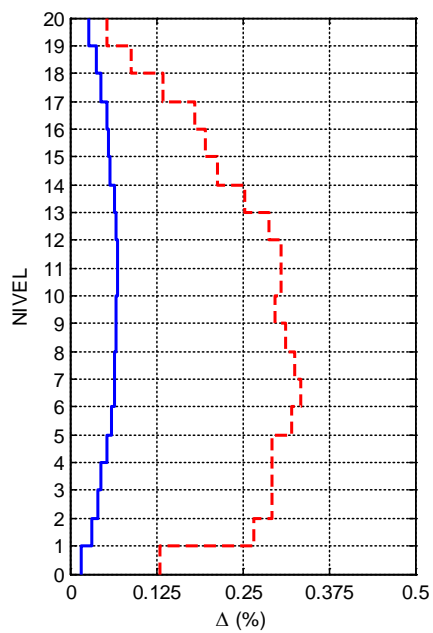
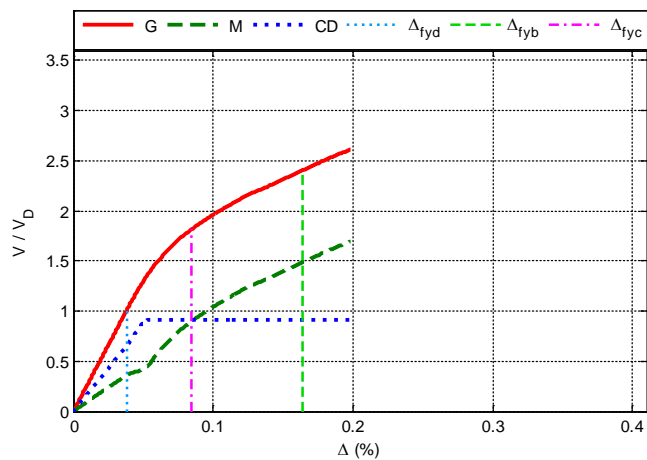


Figura A.271 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

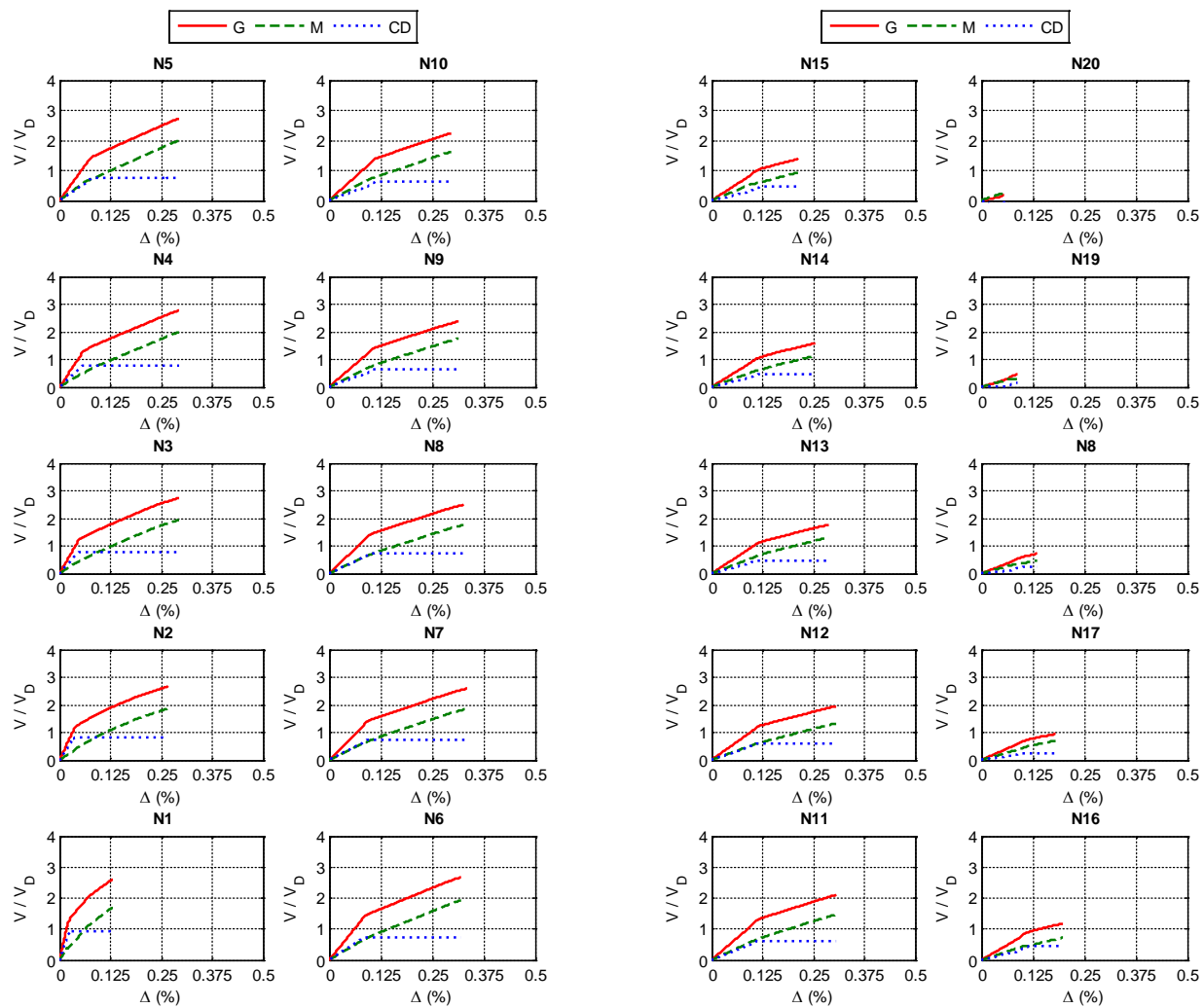


Figura A.272 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

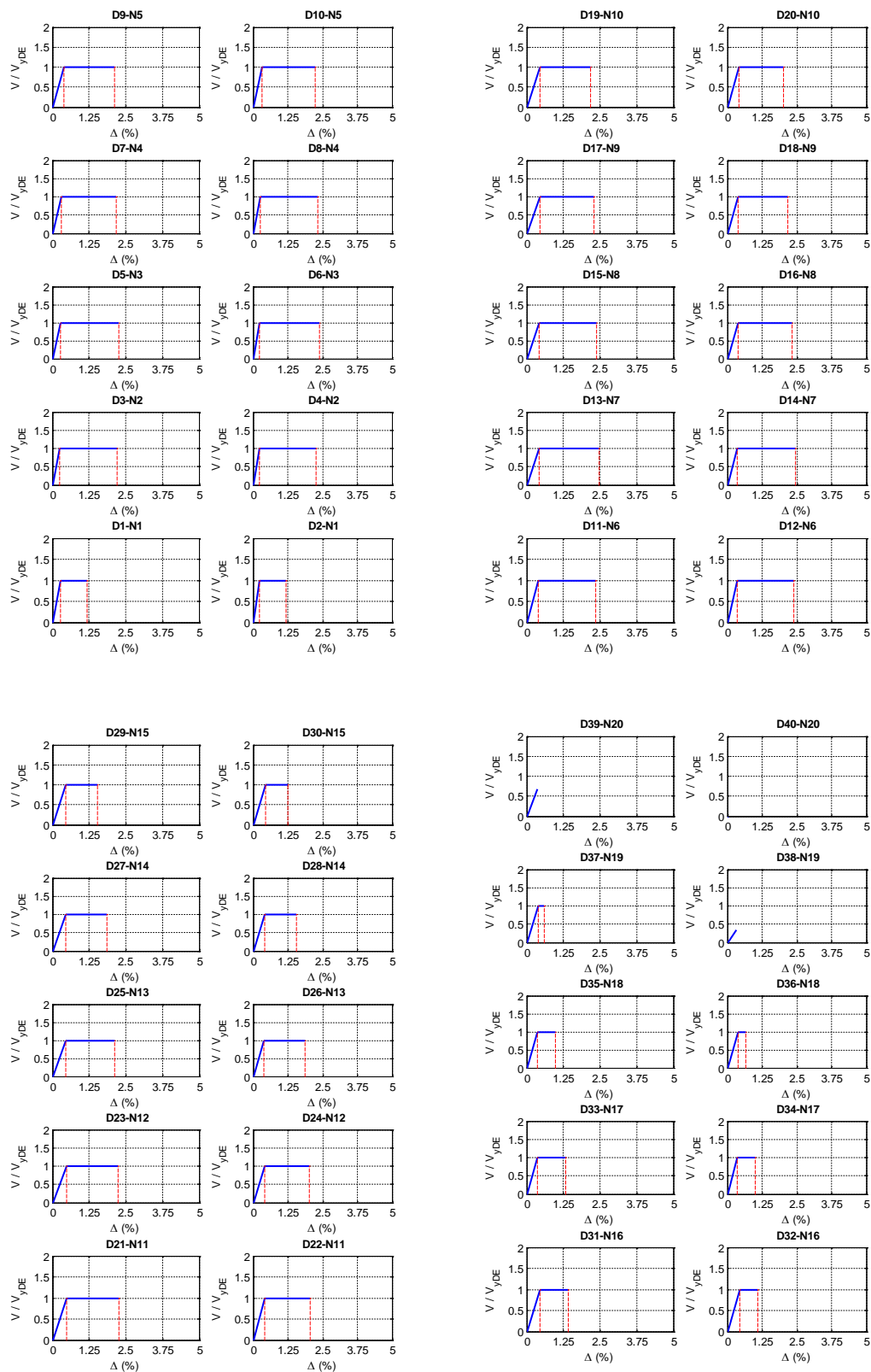


Figura A.273 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

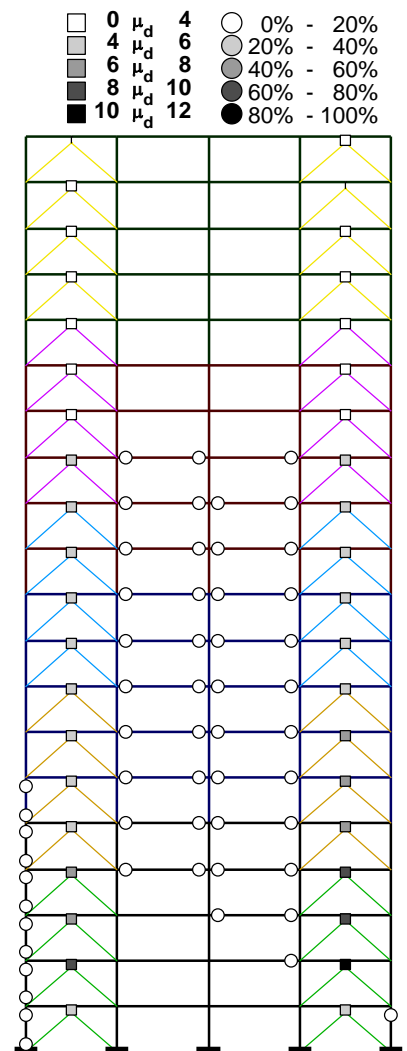
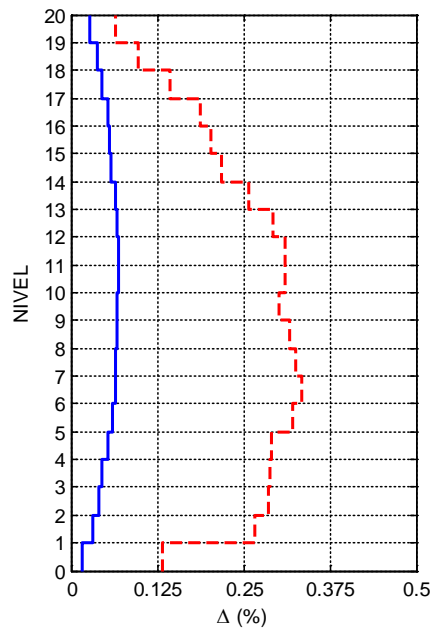
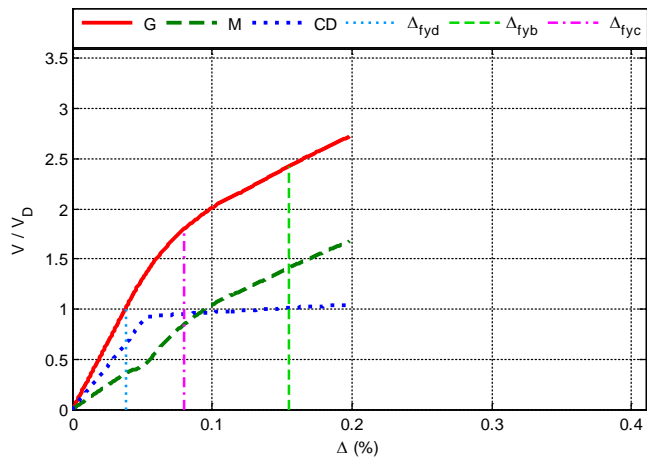


Figura A.274 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

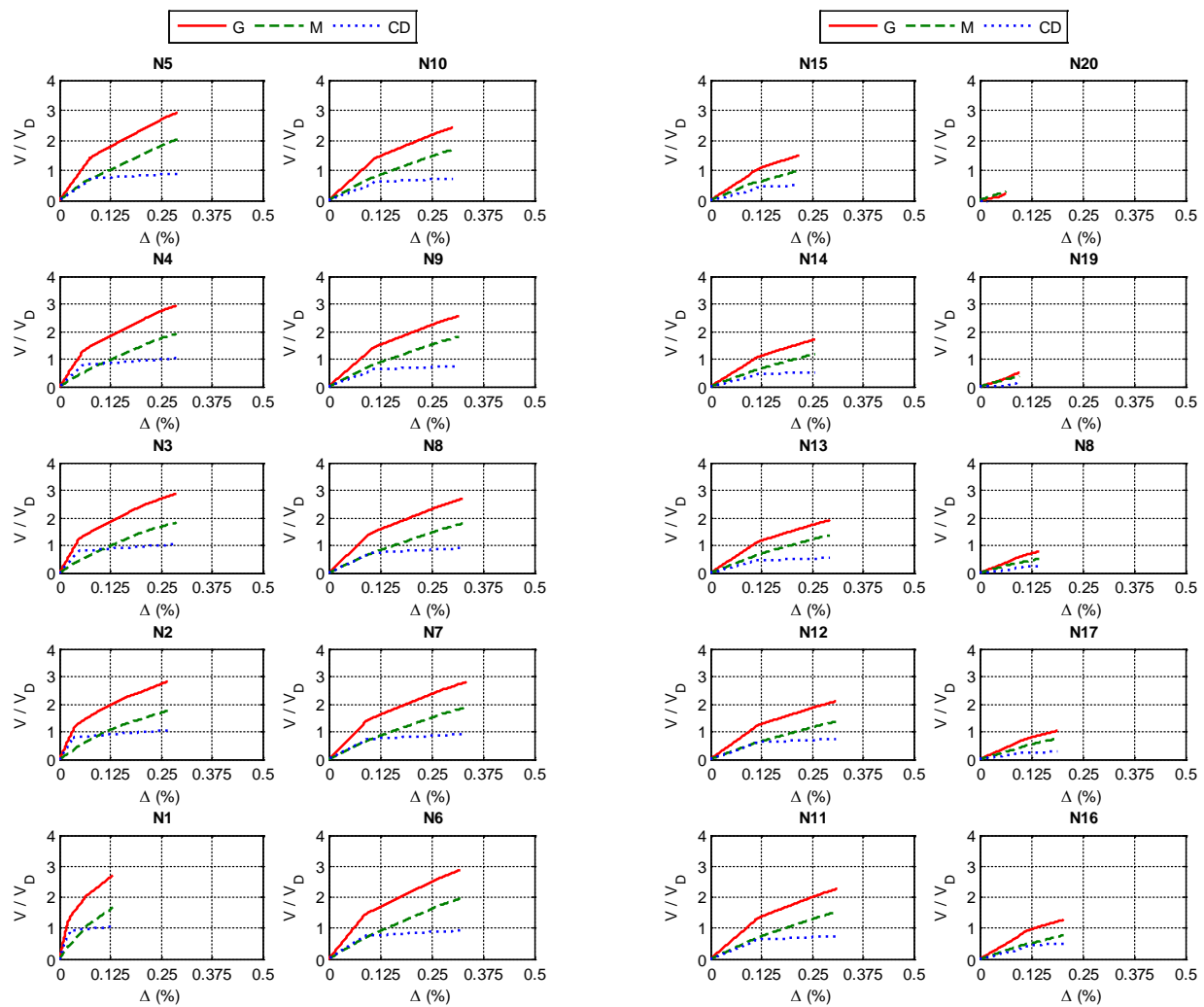


Figura A.275 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

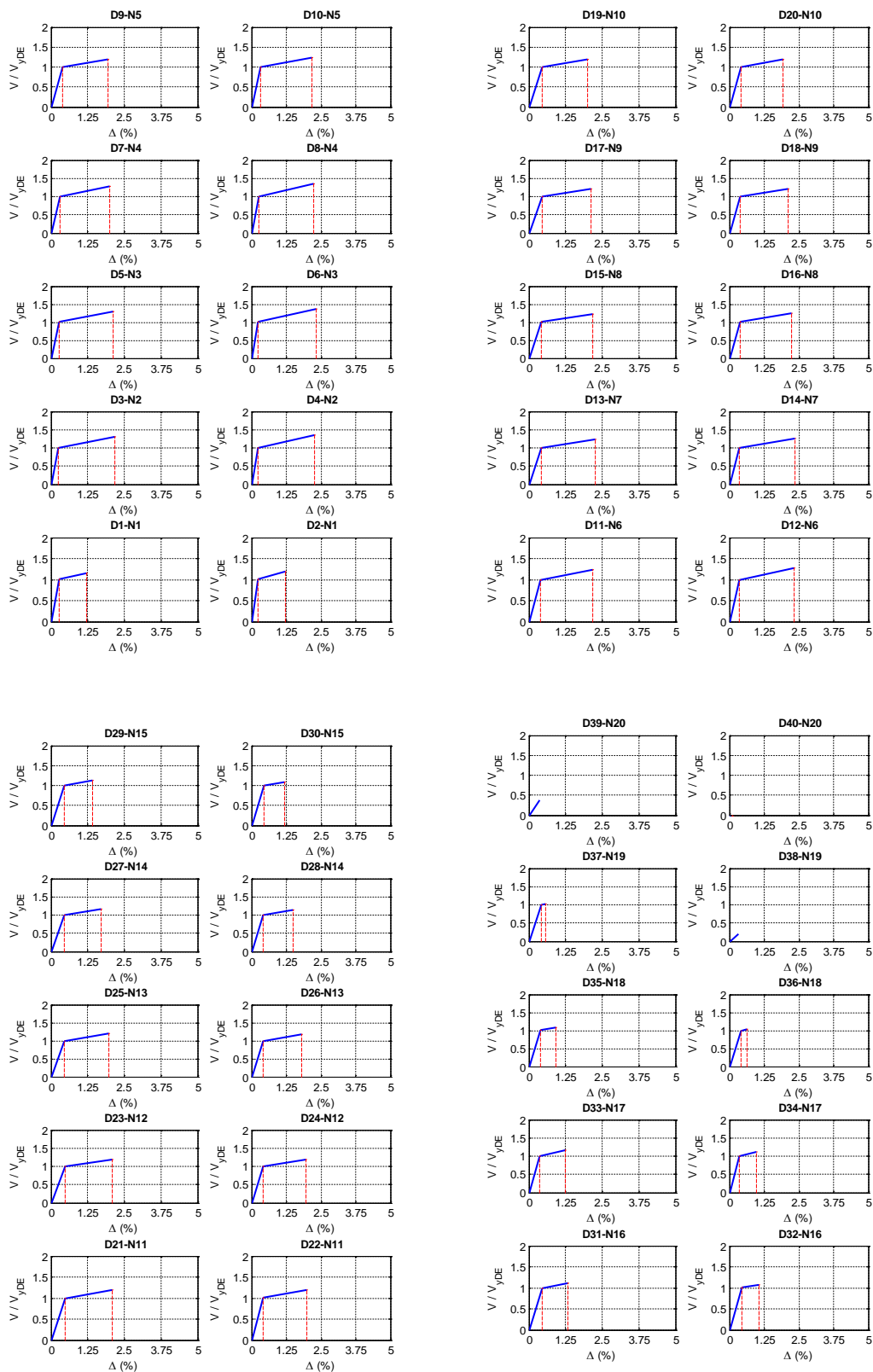


Figura A.276 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

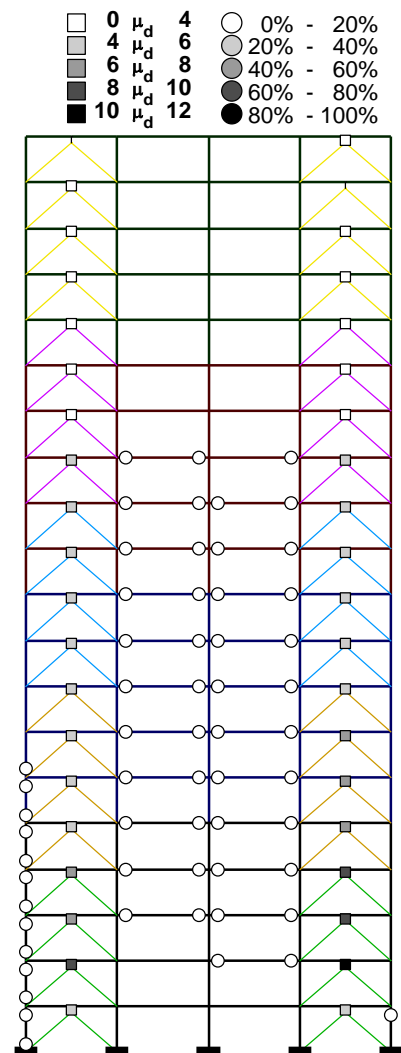
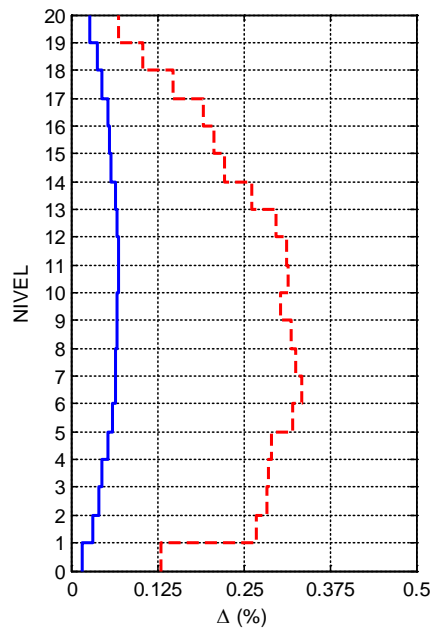
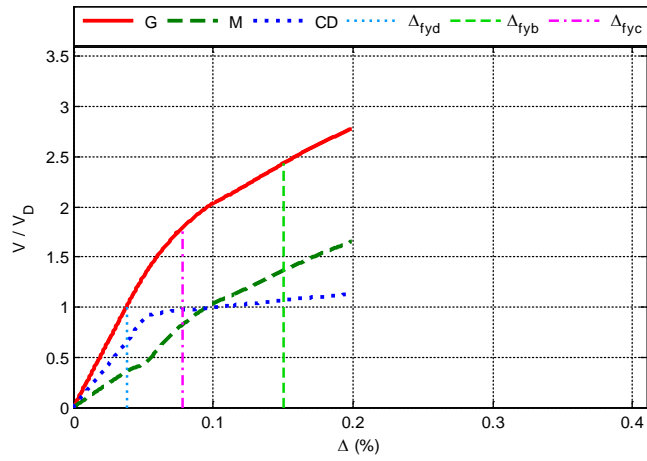


Figura A.277 $N = 20$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

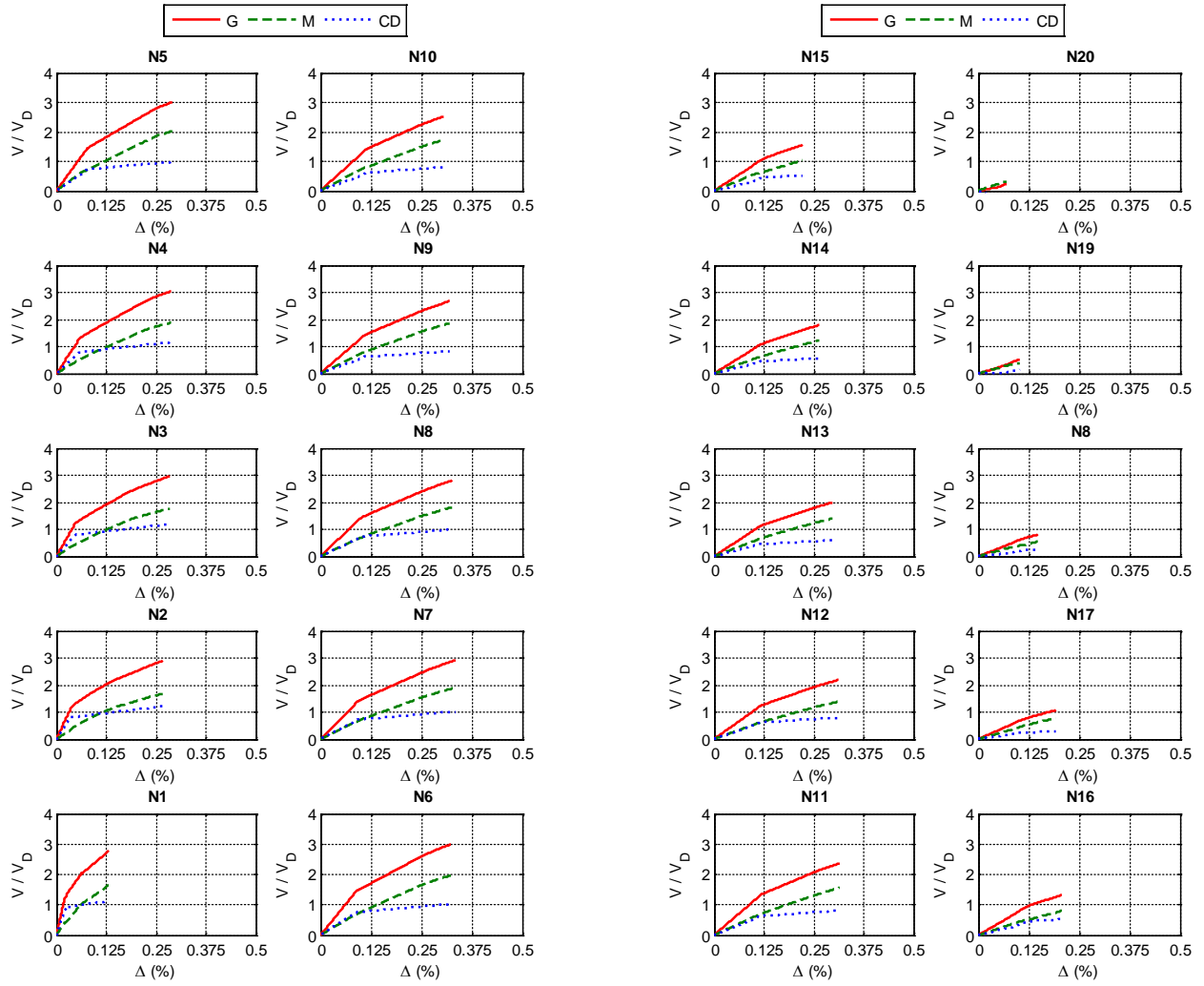


Figura A.278 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

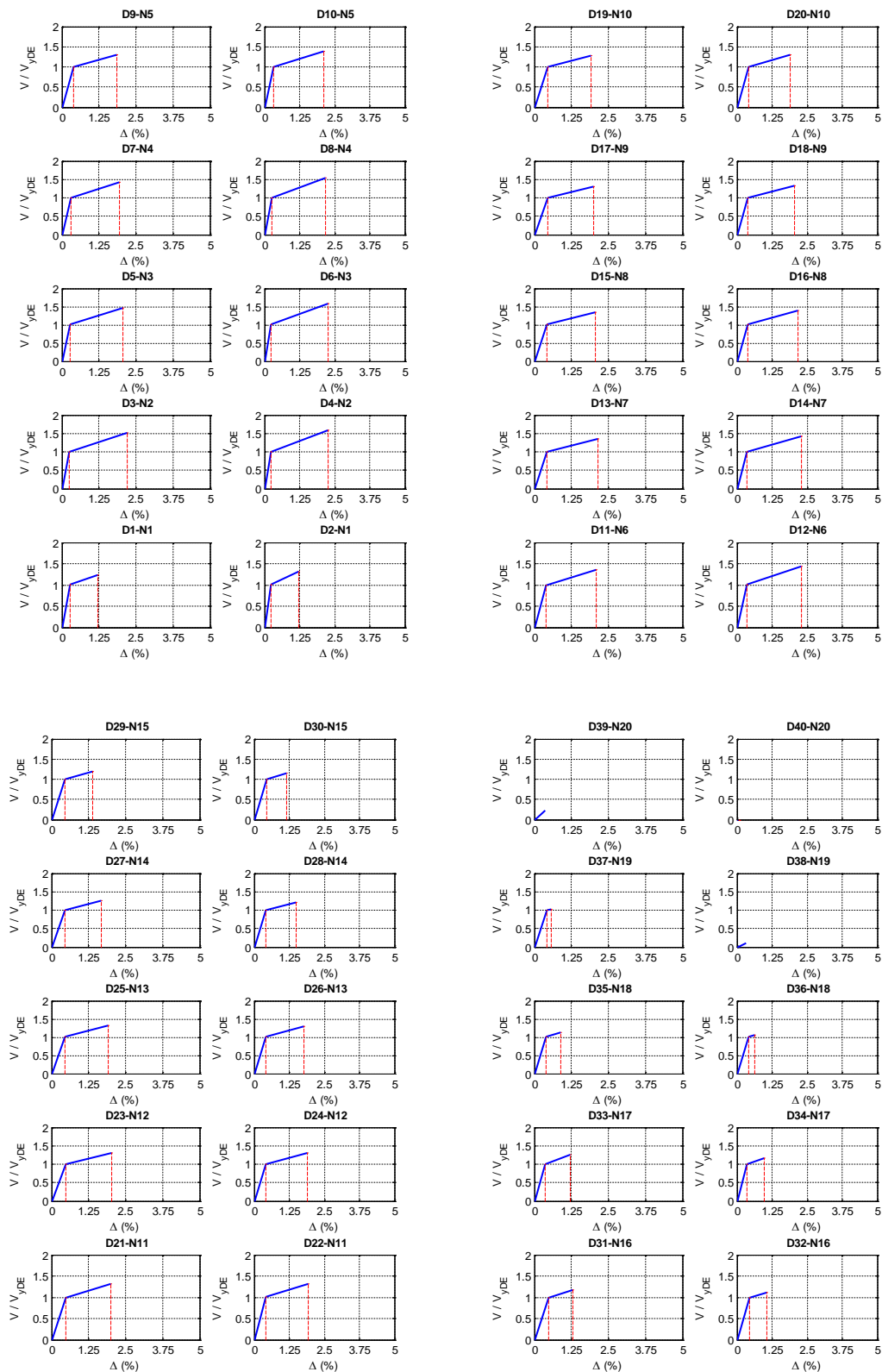


Figura A.279 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

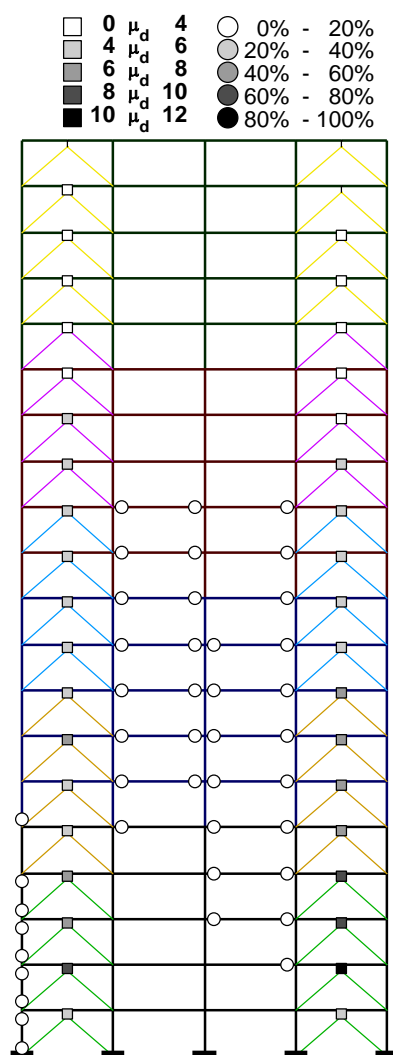
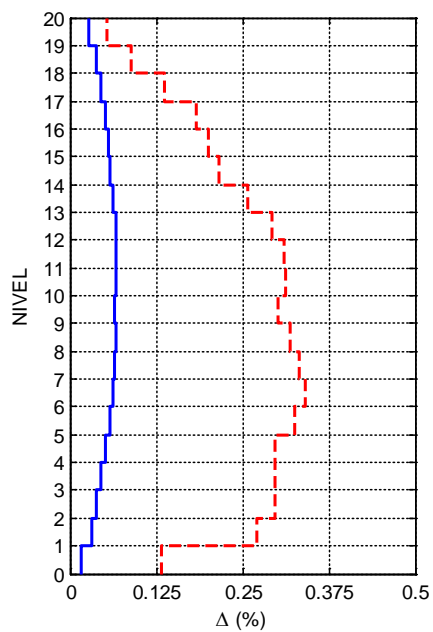
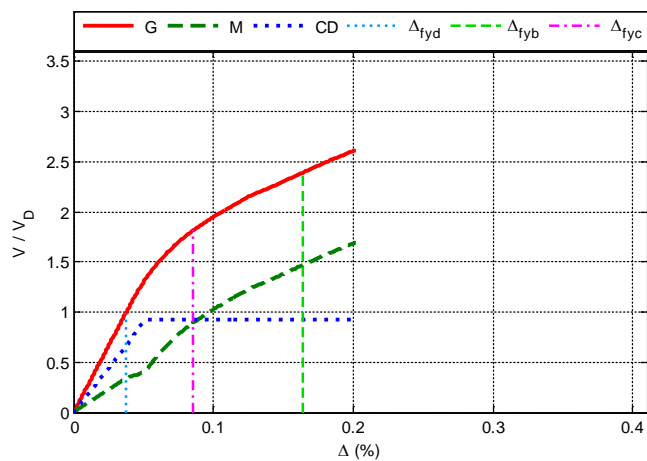


Figura A.280 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

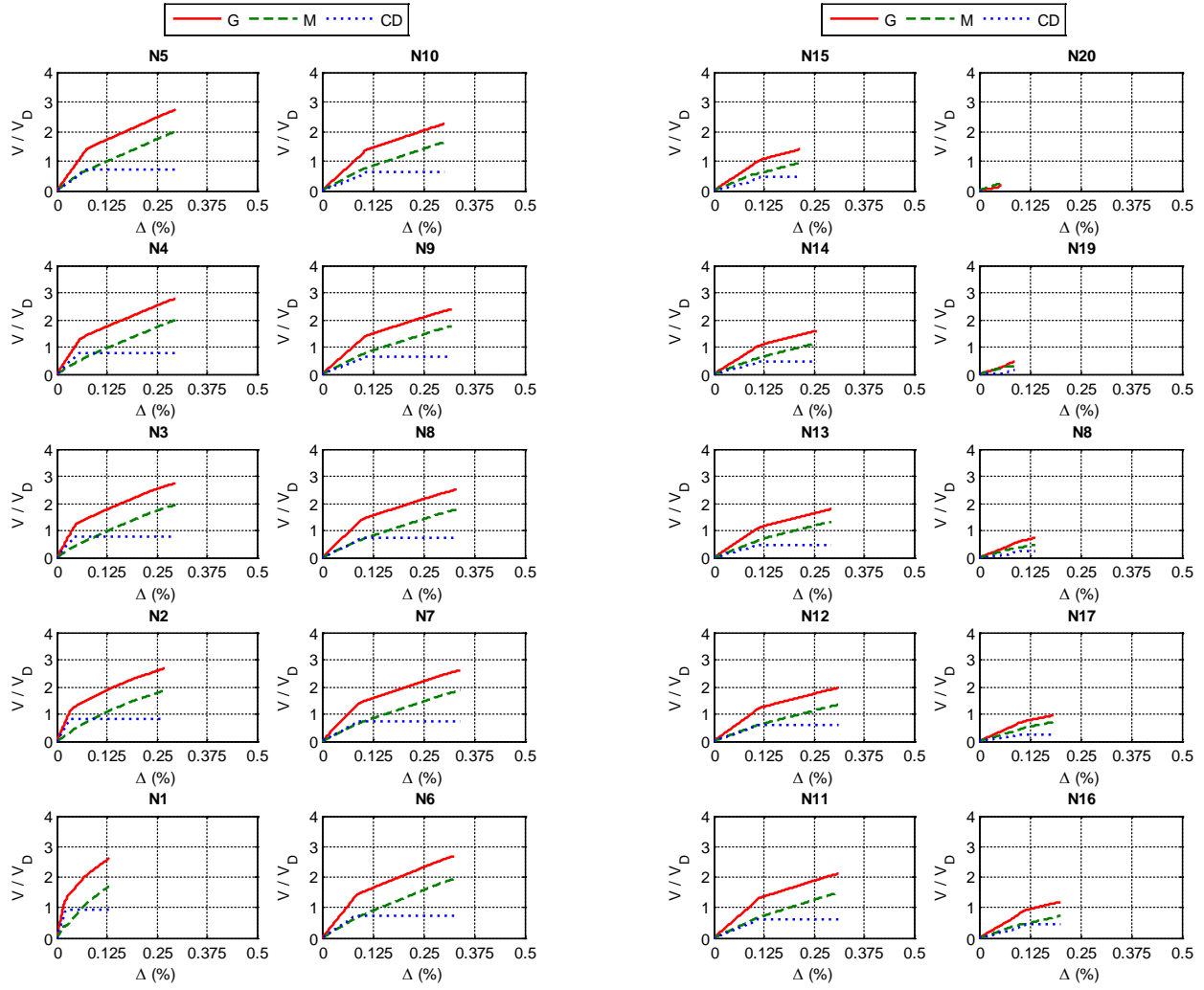


Figura A.281 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

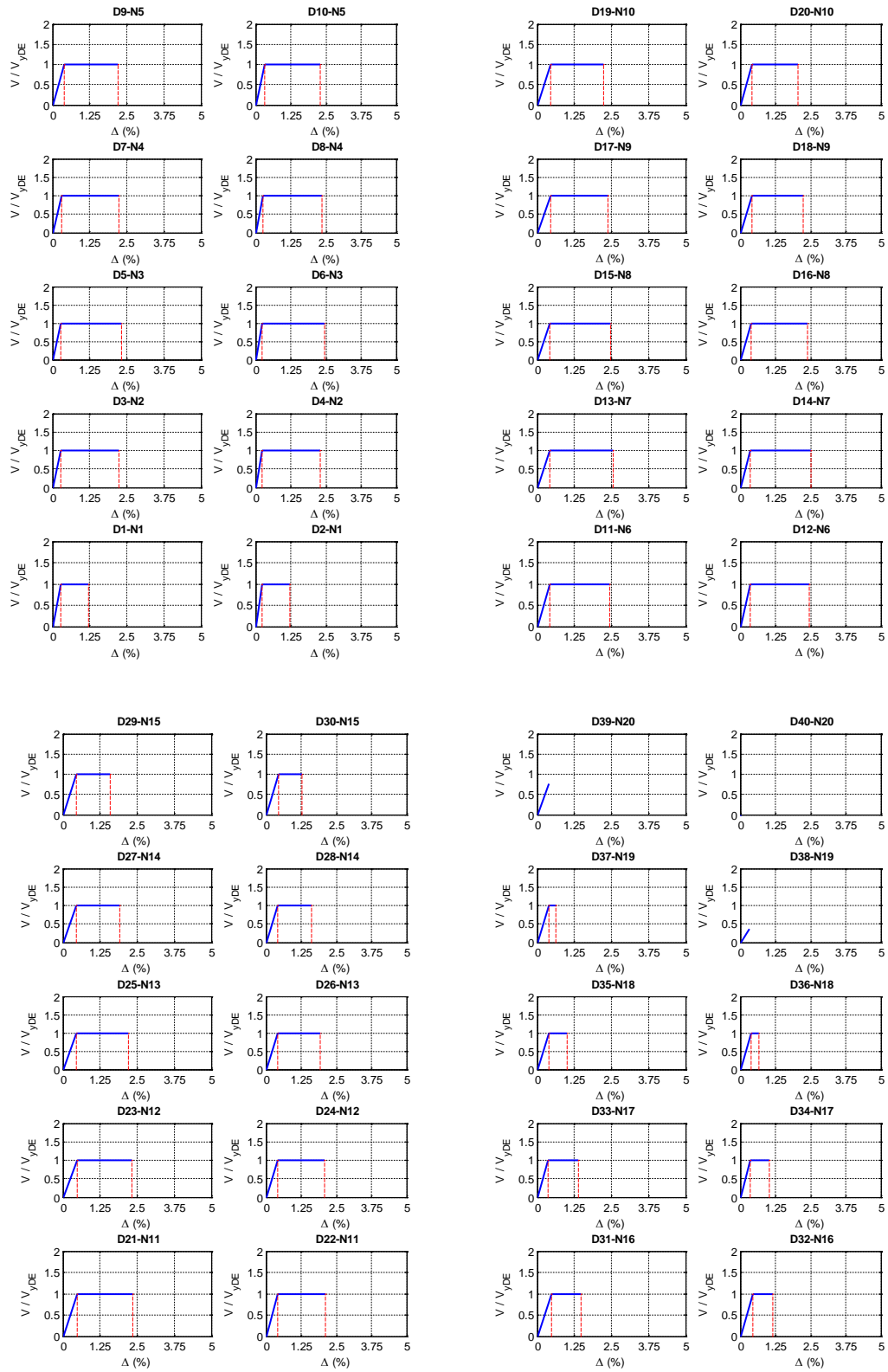


Figura A.282 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

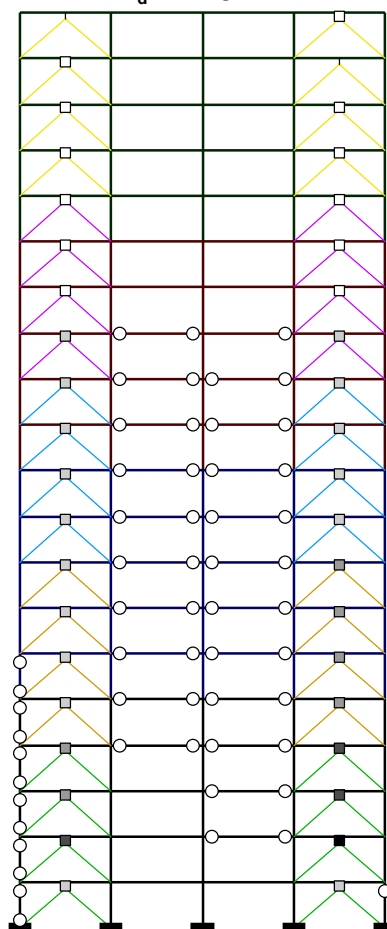
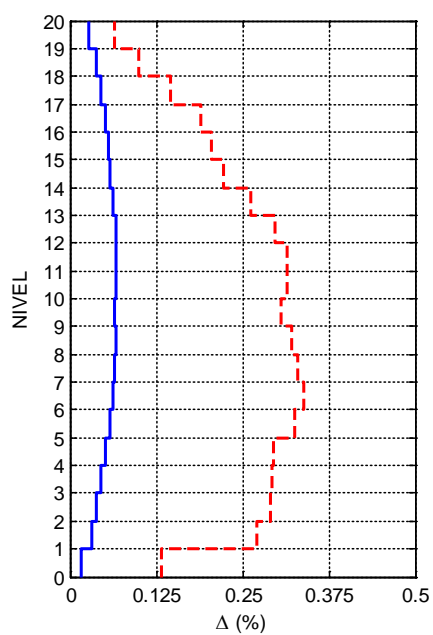
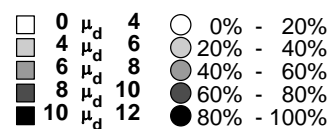
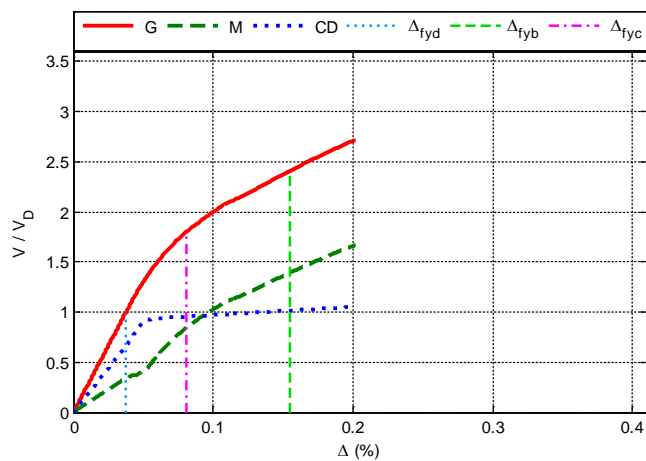


Figura A.283 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

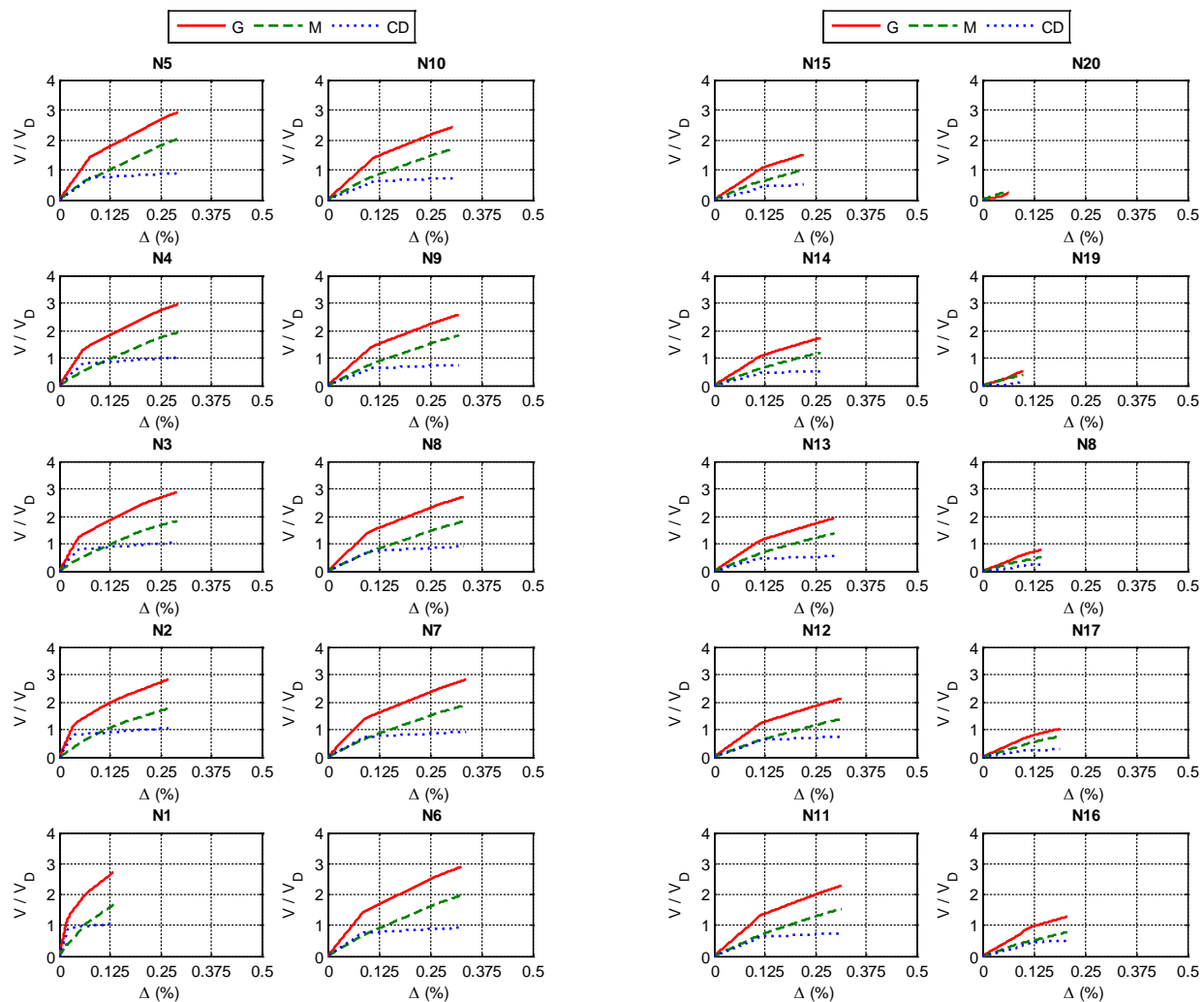


Figura A.284 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

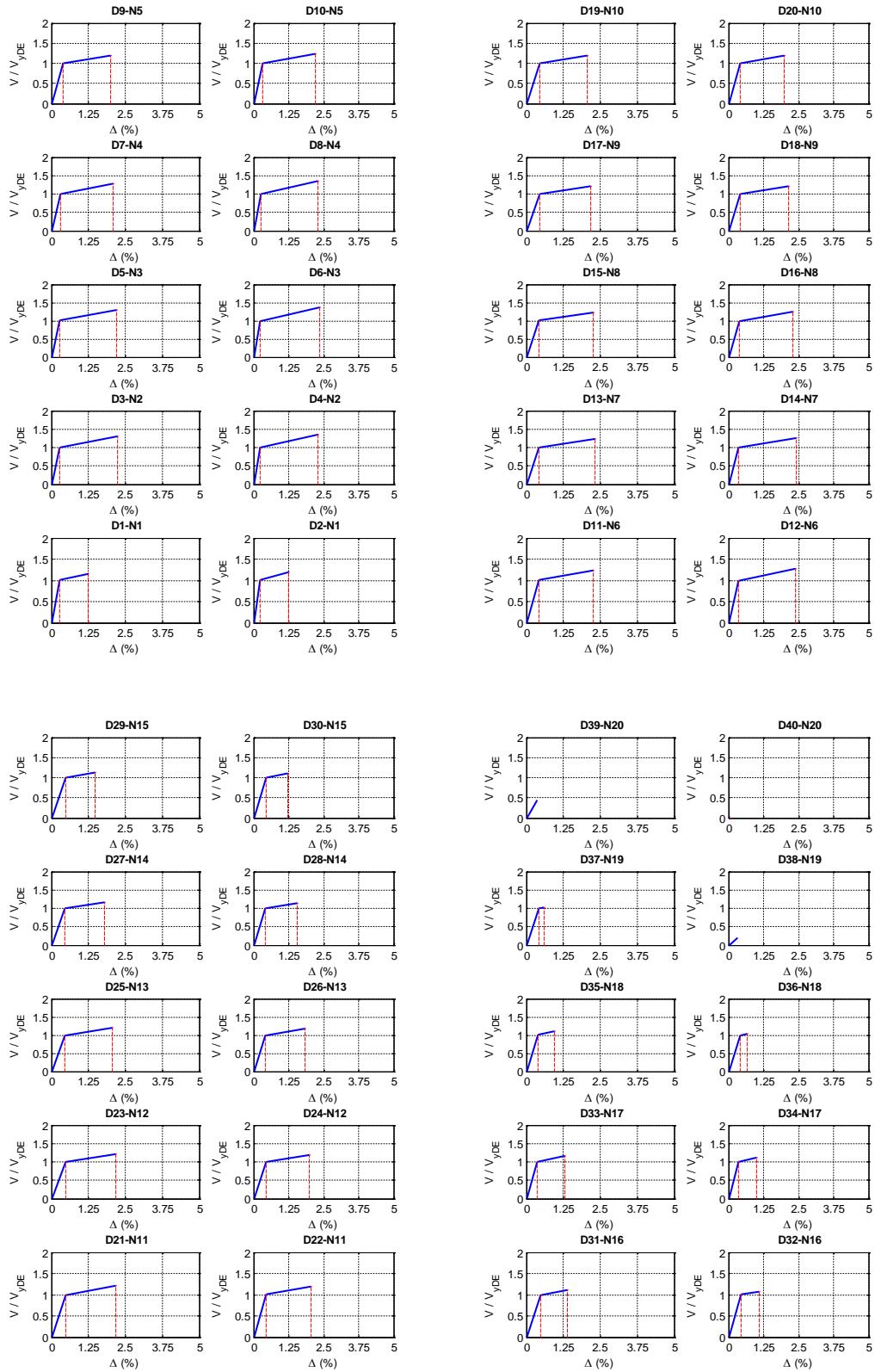


Figura A.285 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

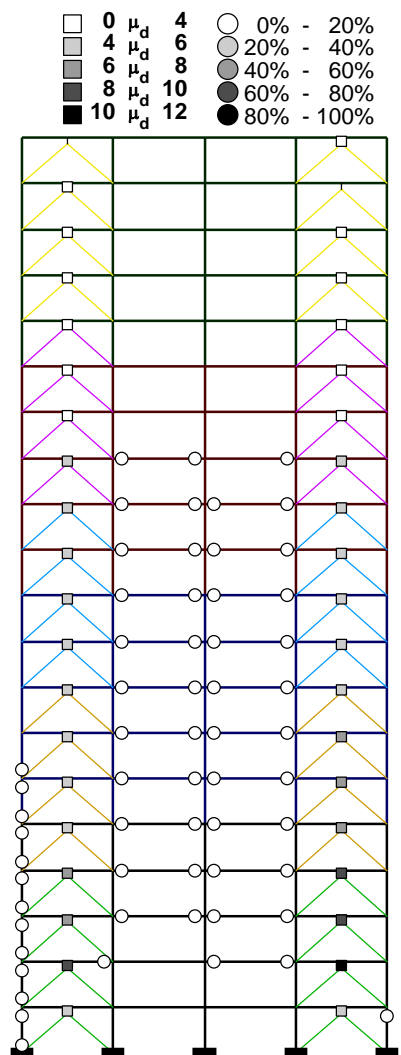
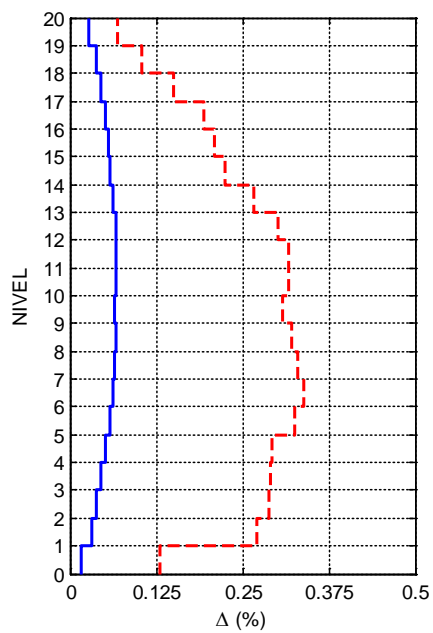
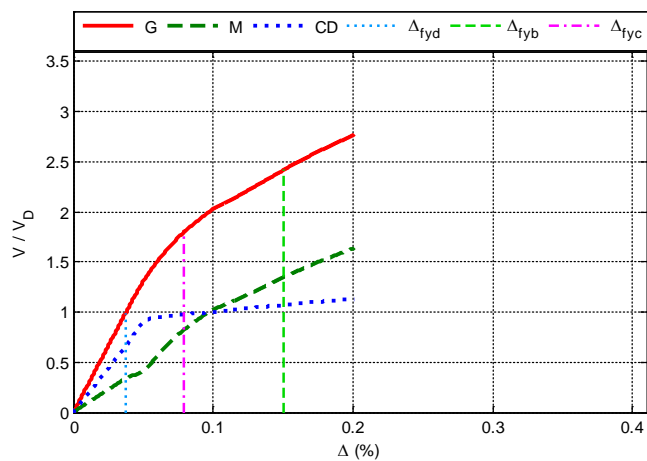


Figura A.286 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

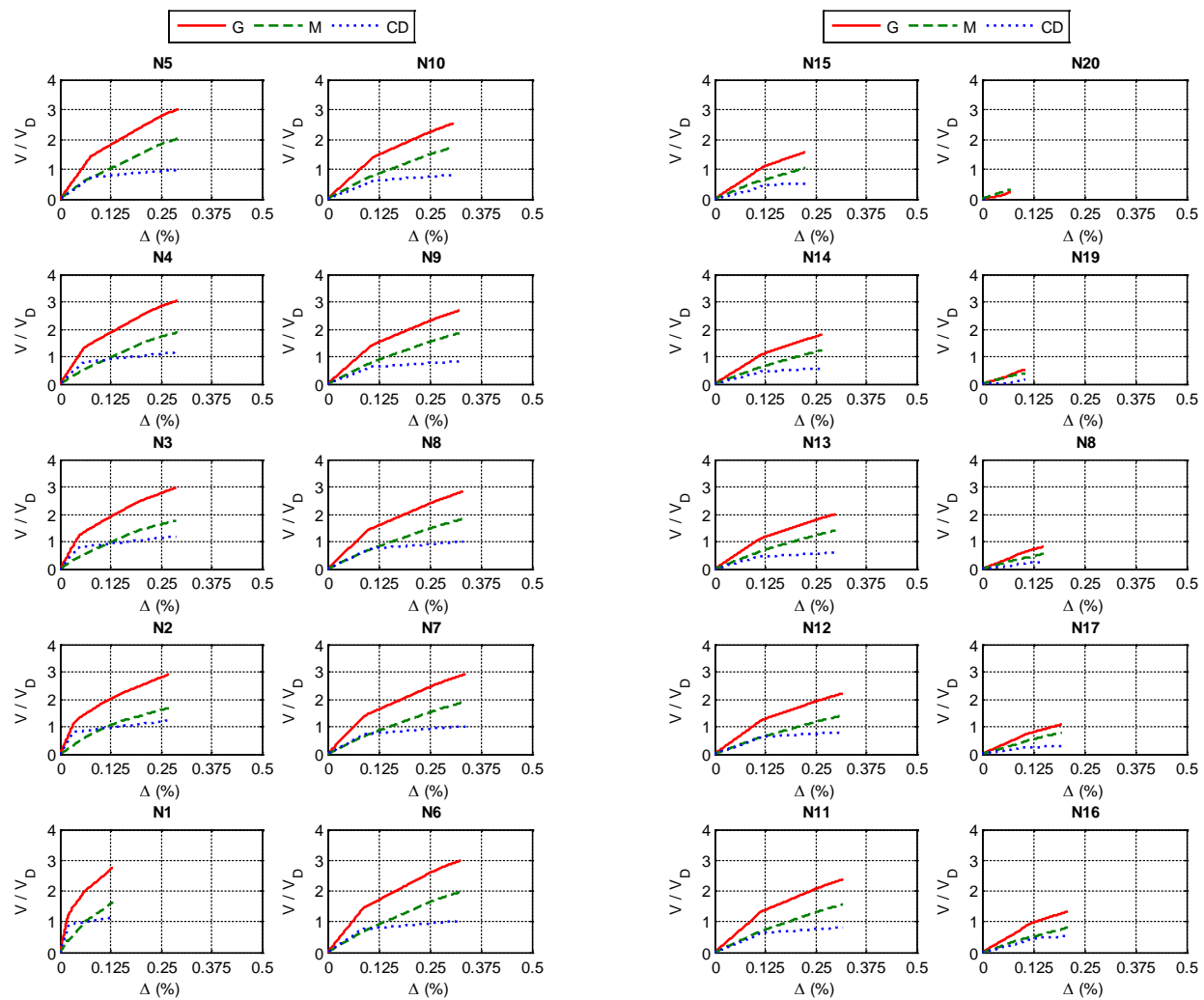


Figura A.287 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

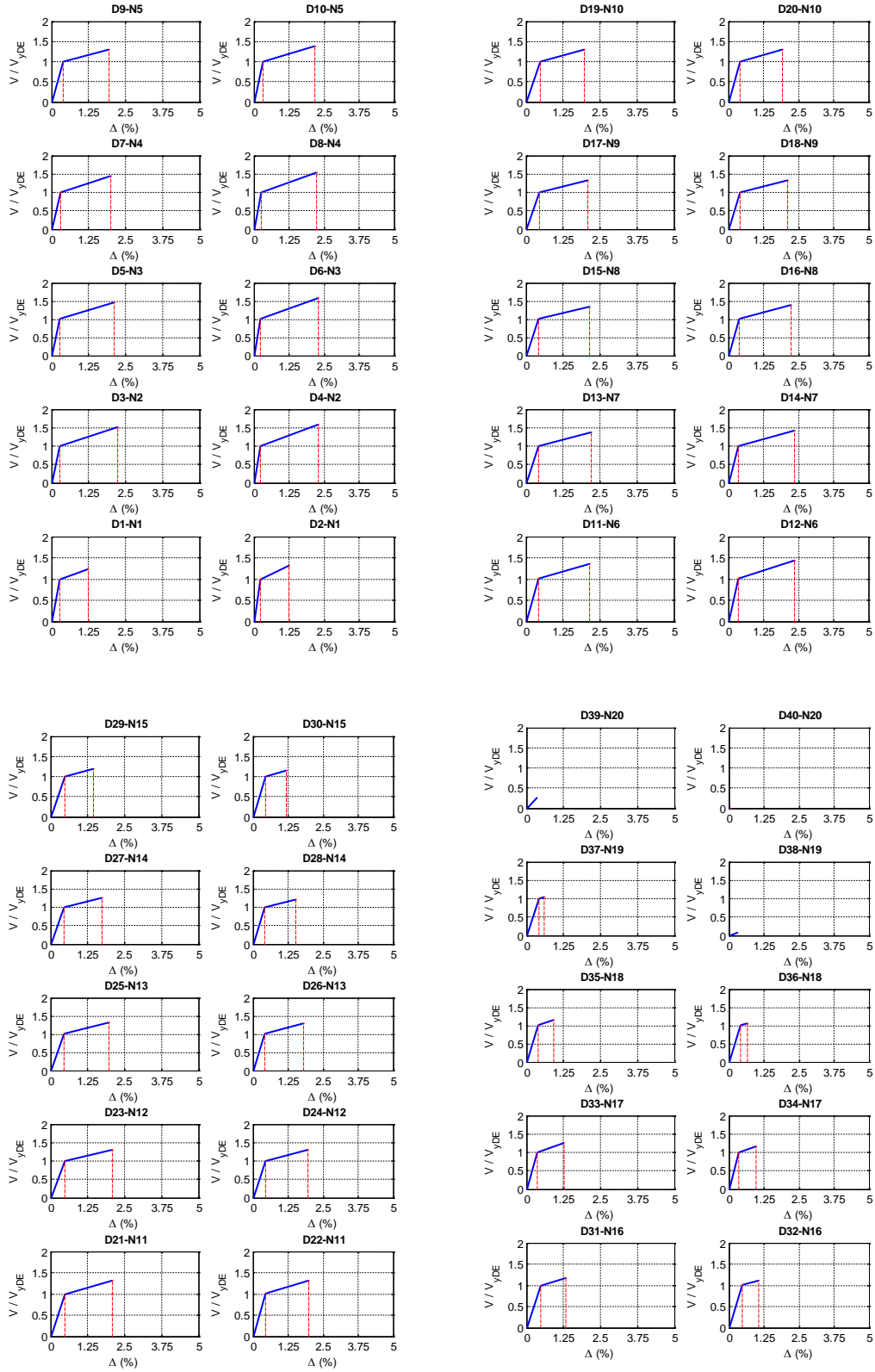


Figura A.288 $N = 20, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

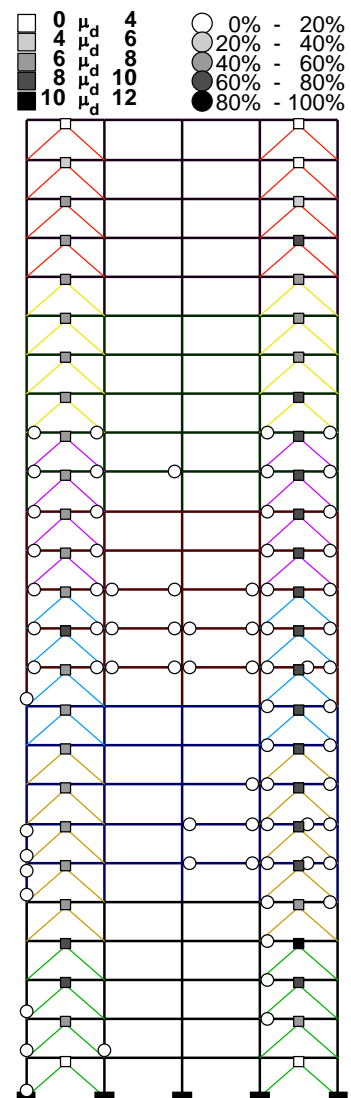
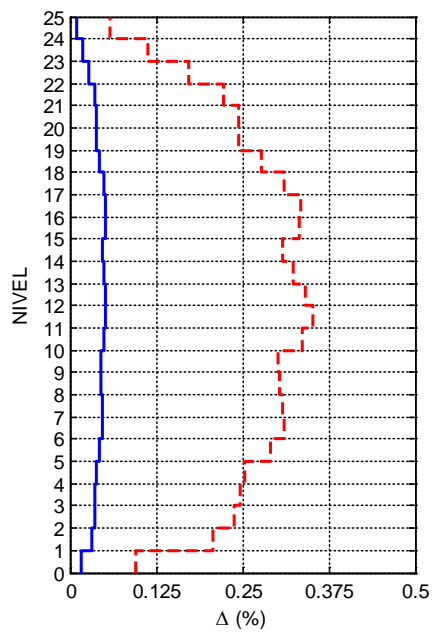
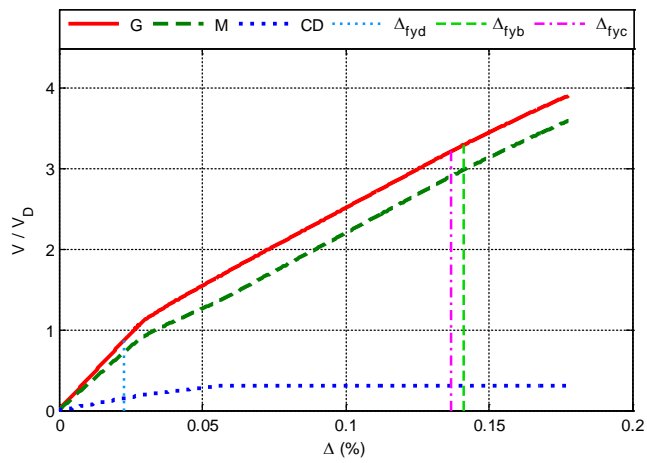


Figura A.289 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

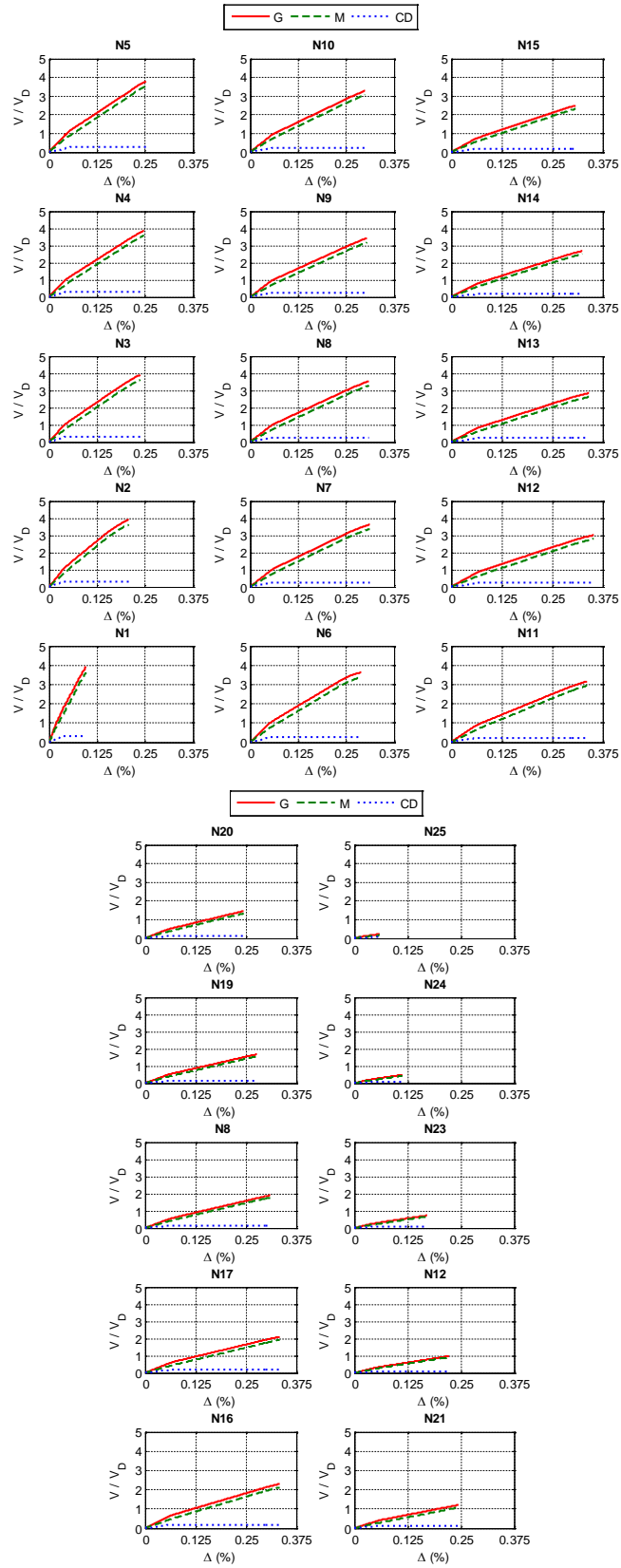


Figura A.290 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

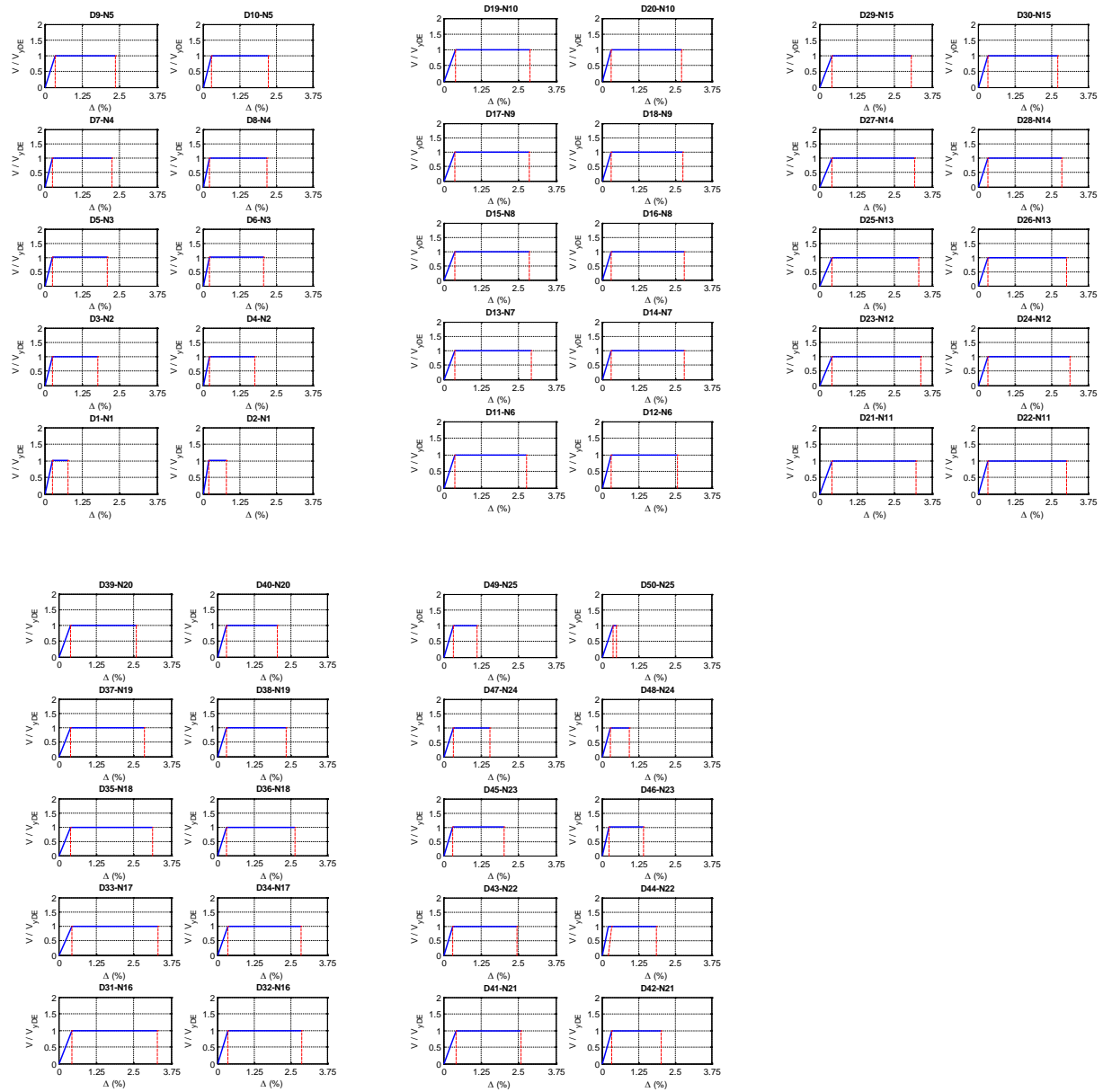


Figura A.291 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

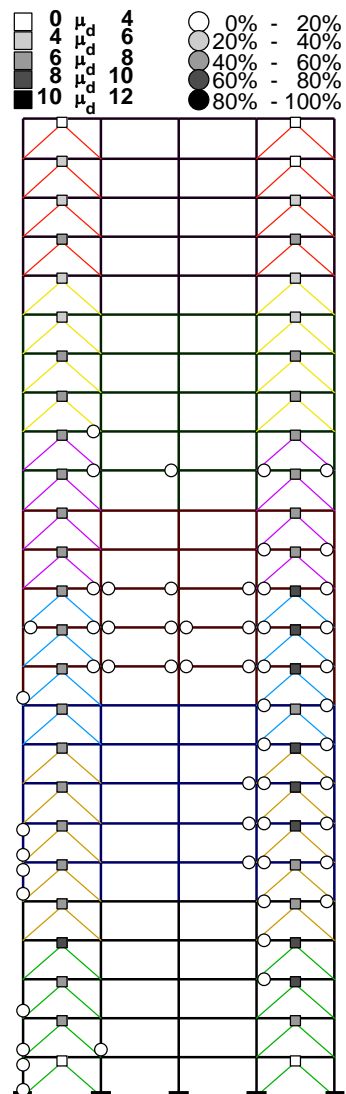
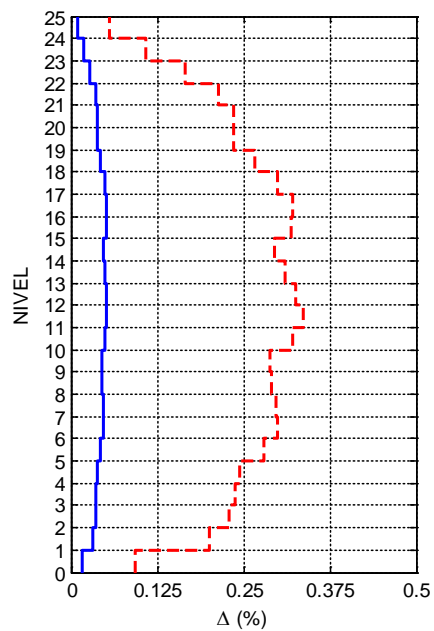
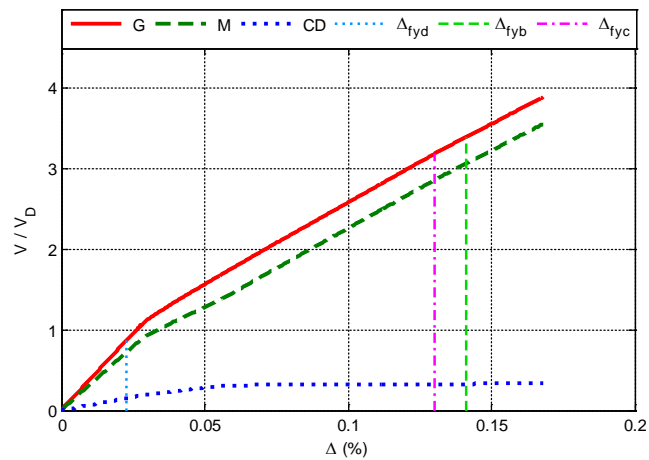


Figura A.292 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

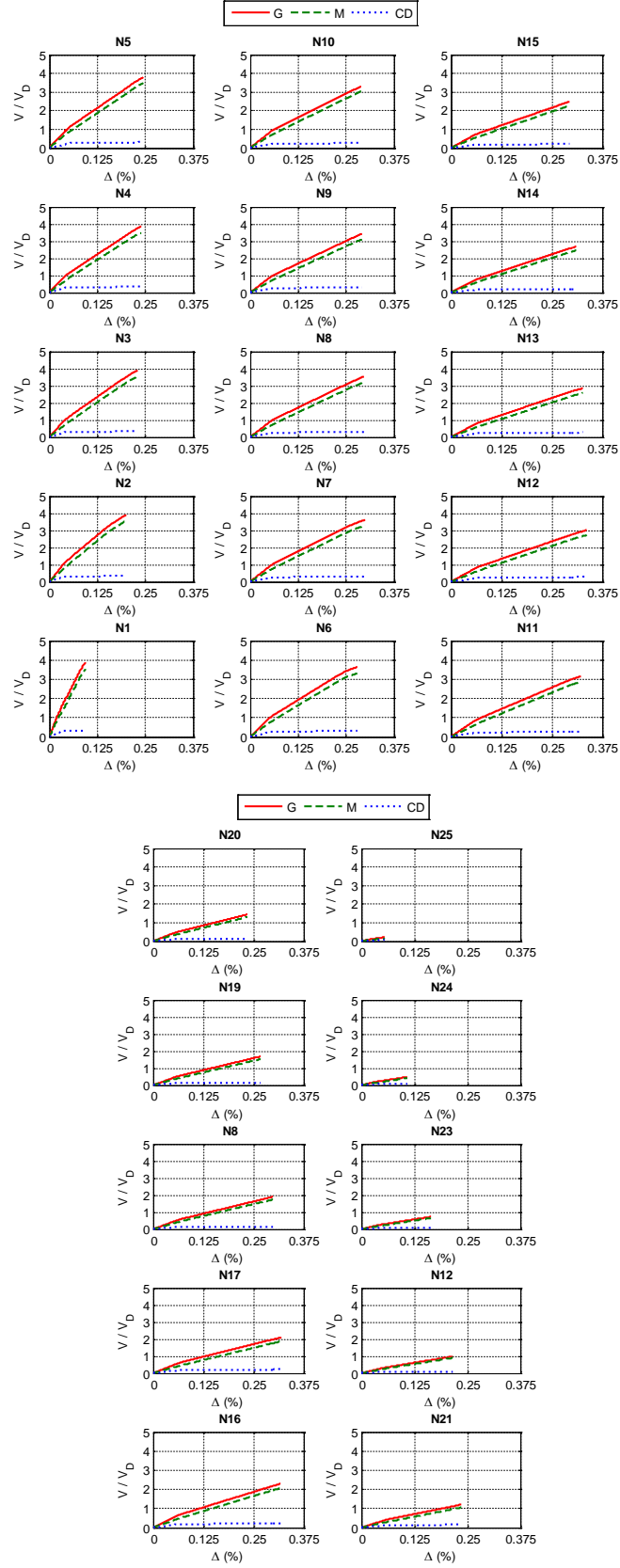


Figura A.293 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

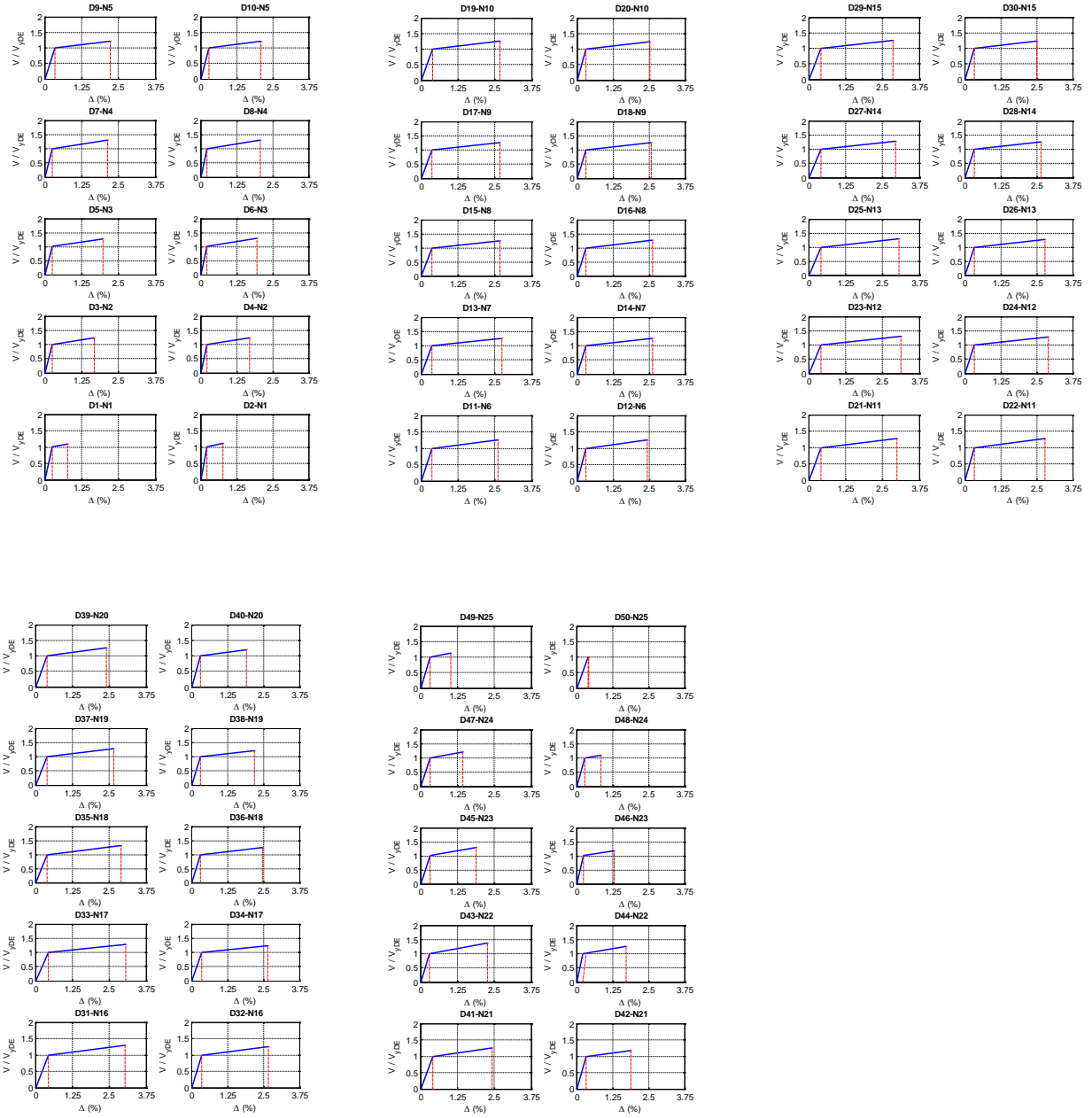


Figura A.294 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

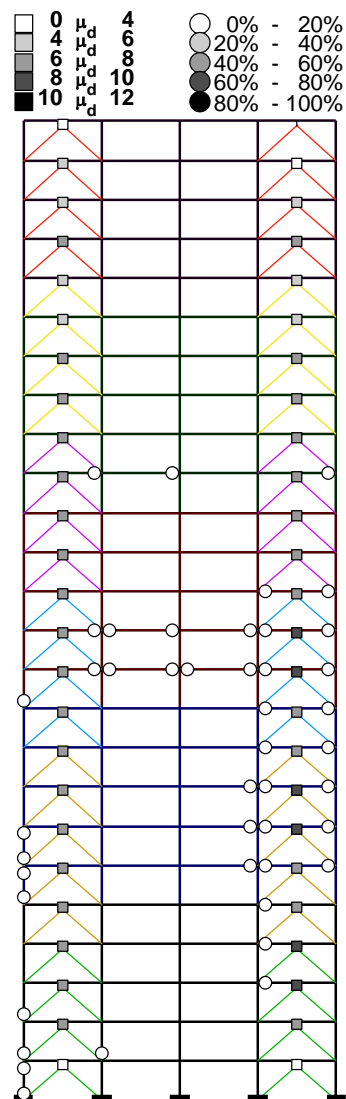
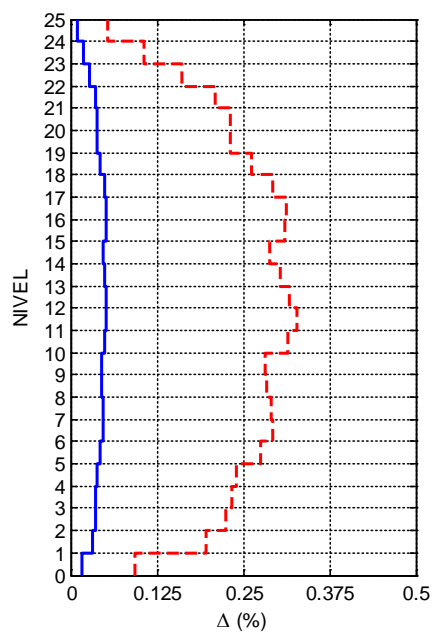
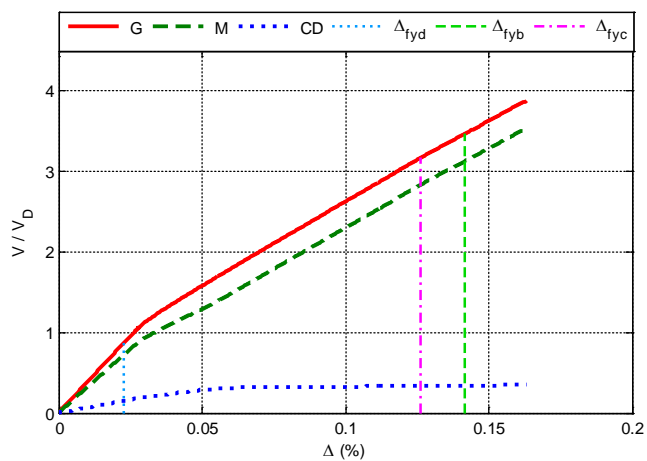


Figura A.295 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

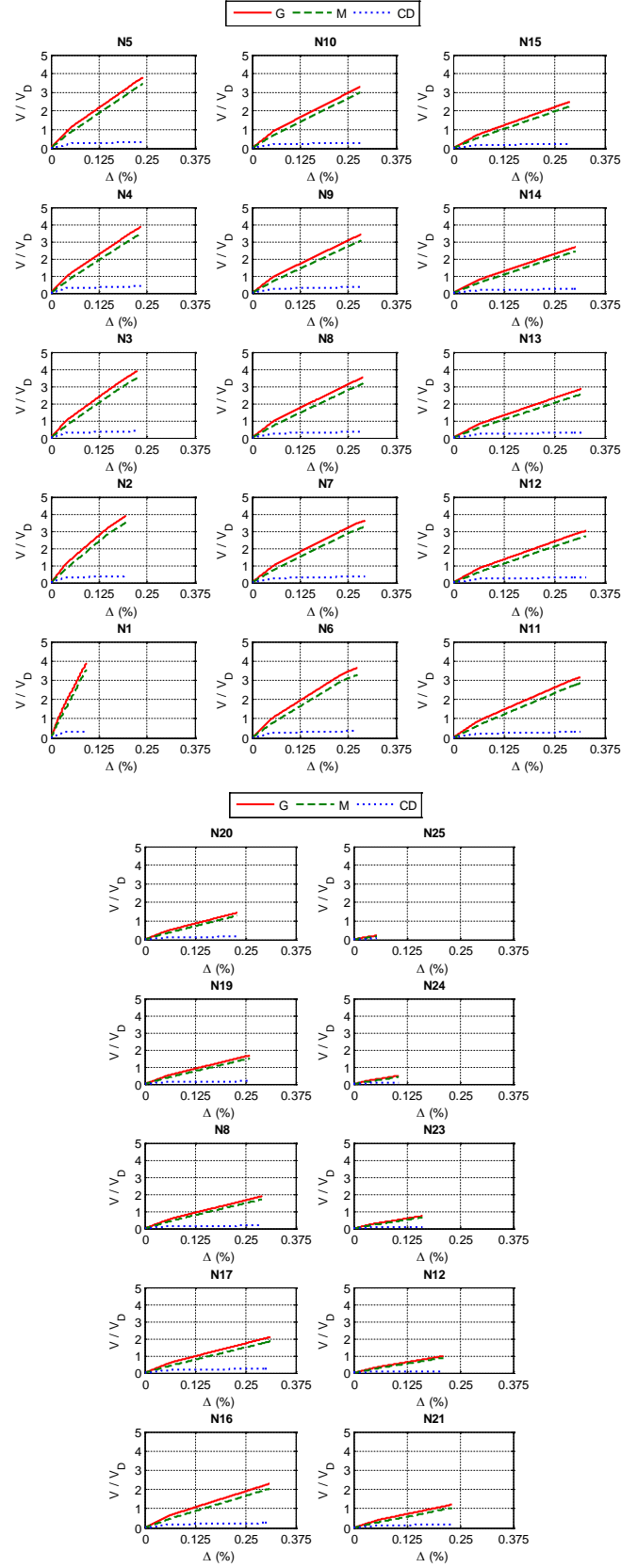


Figura A.296 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.297 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

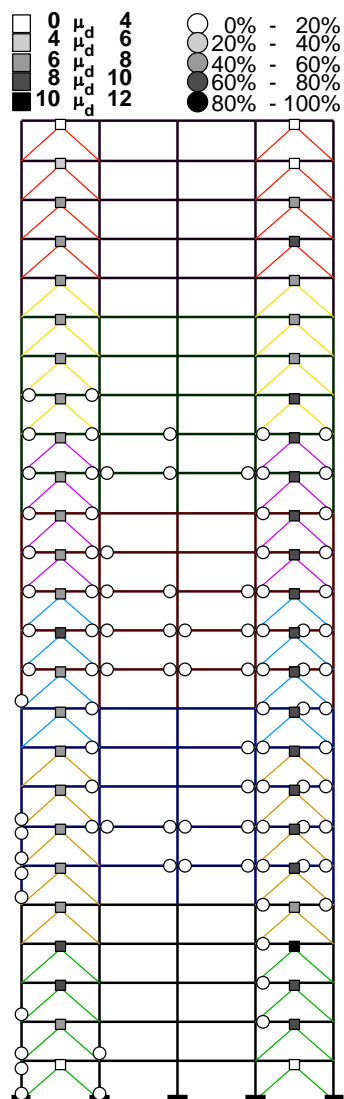
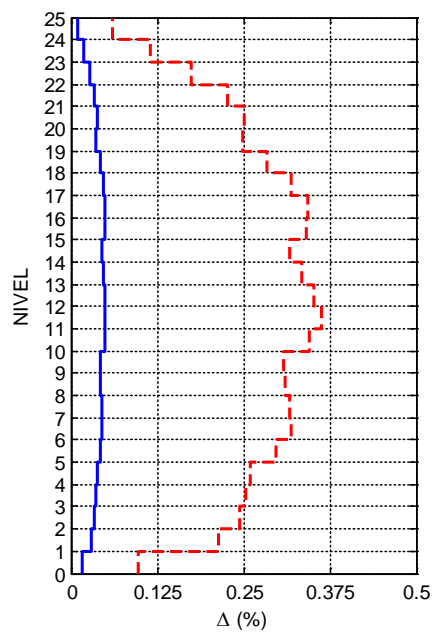
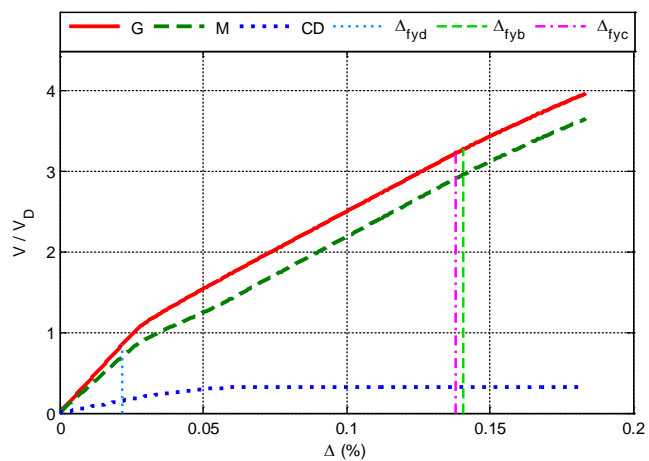


Figura A.298 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

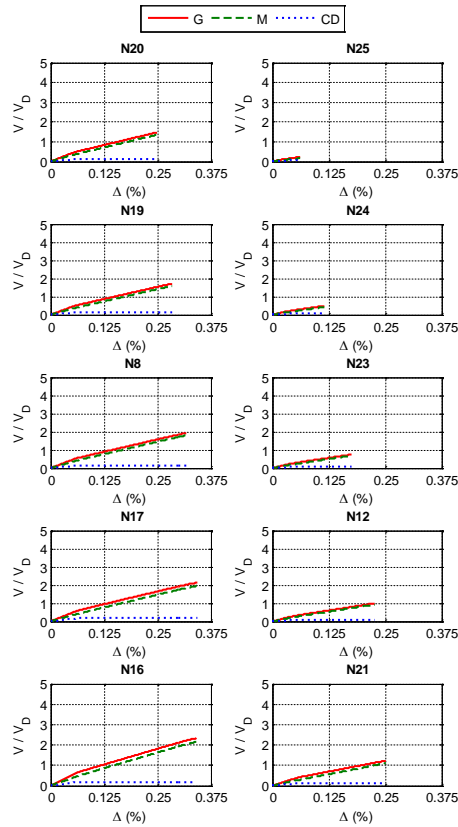
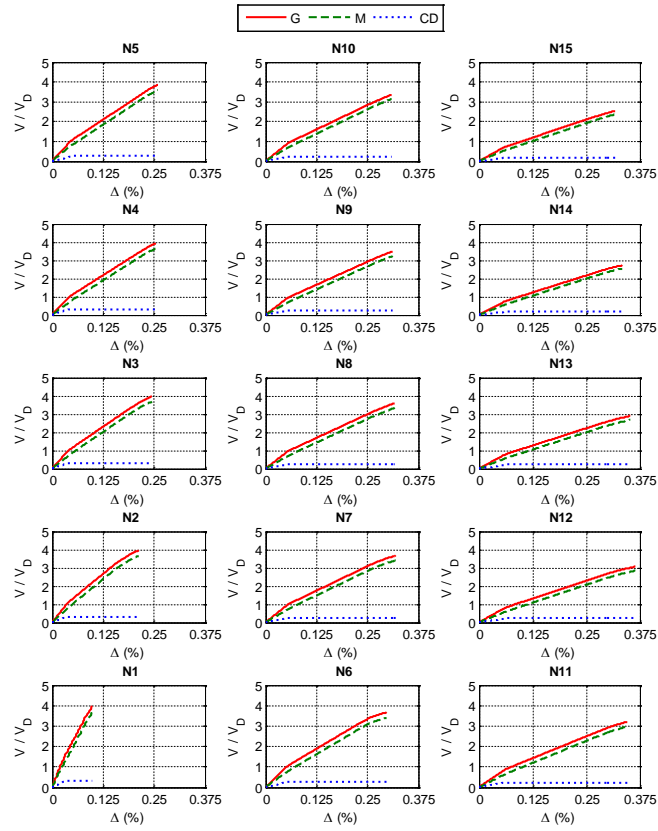


Figura A.299 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

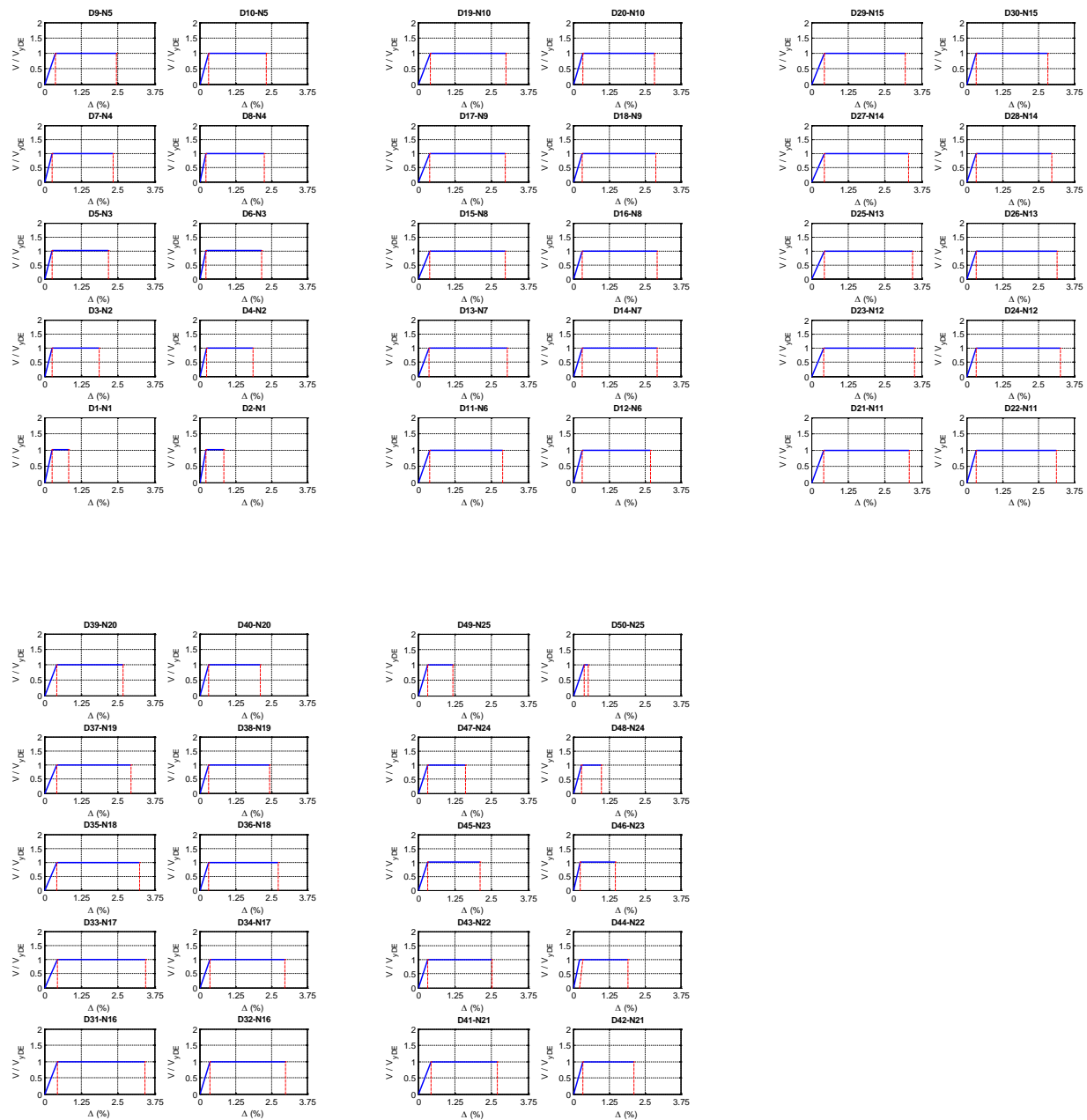


Figura A.300 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

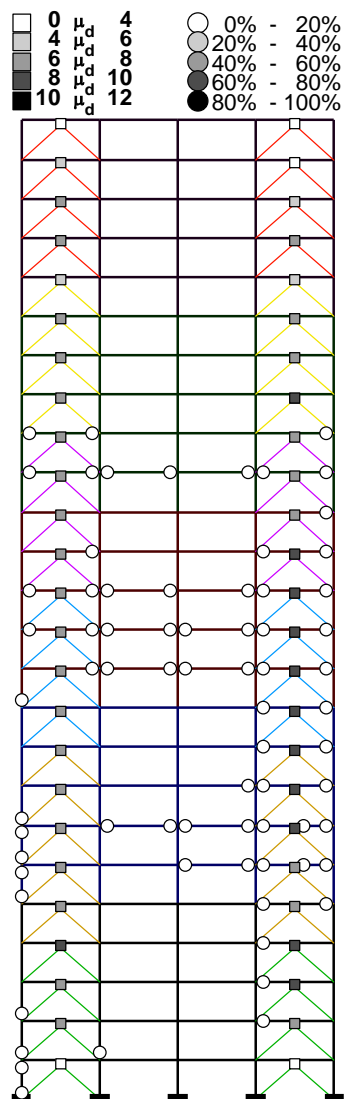
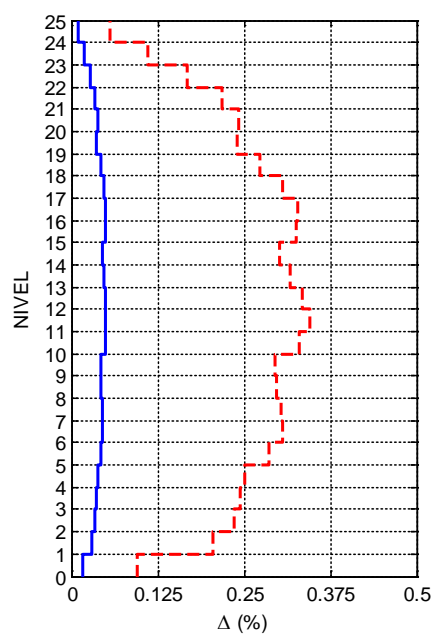
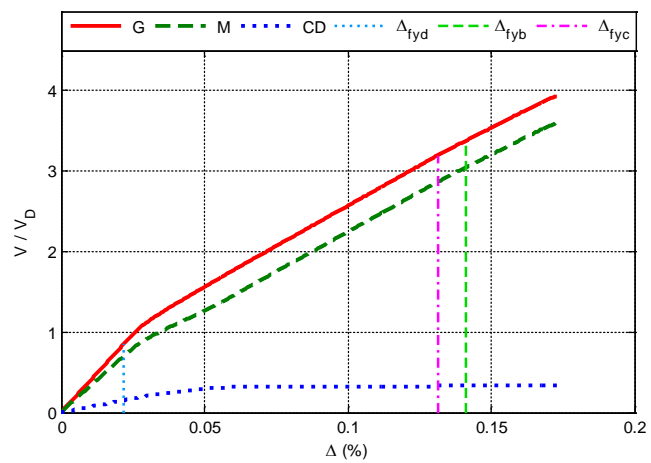


Figura A.301 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

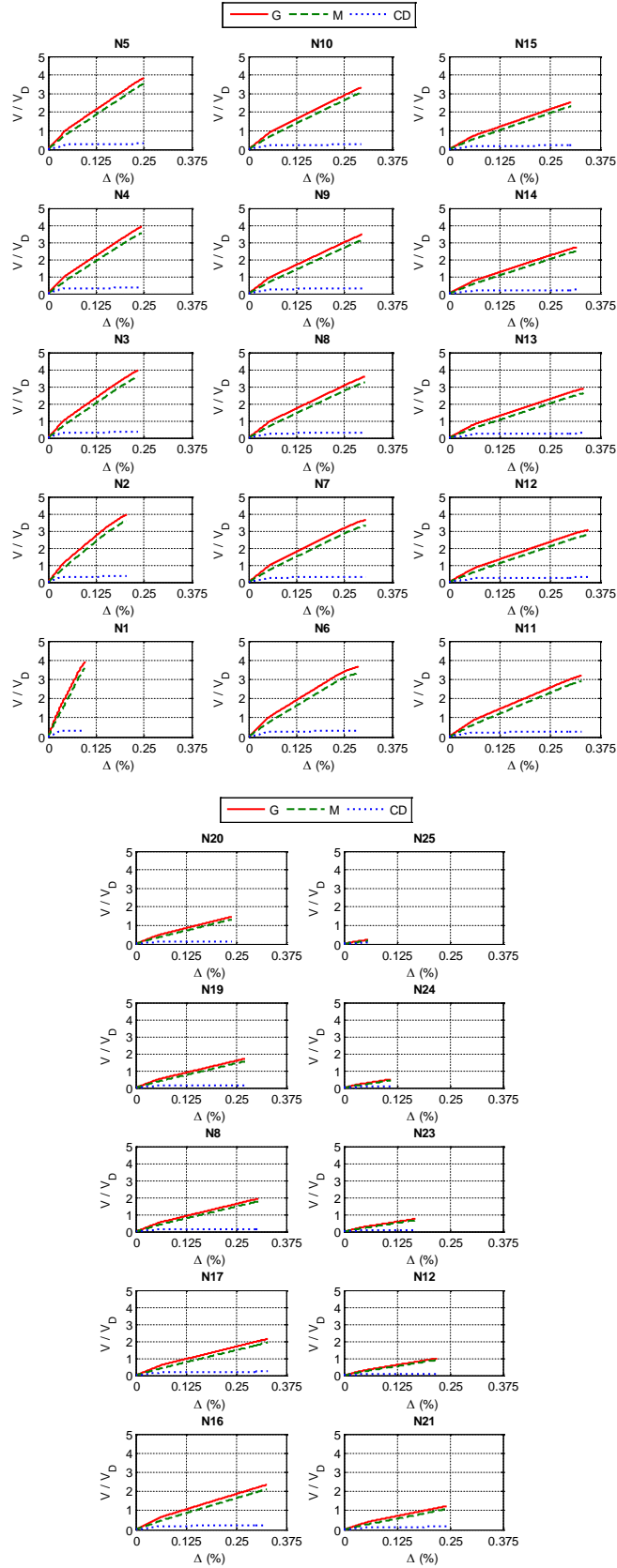


Figura A.302 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

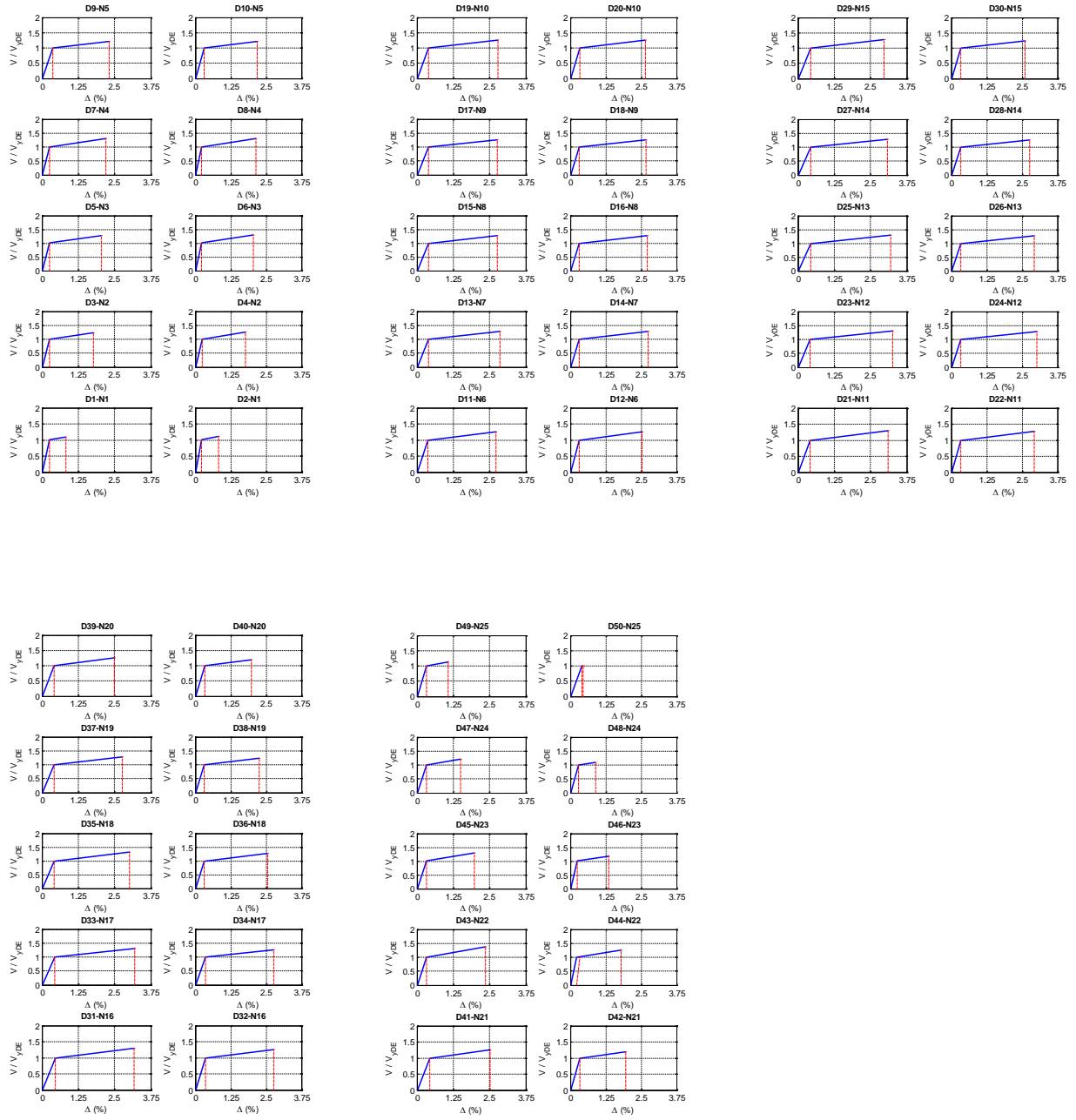


Figura A.303 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

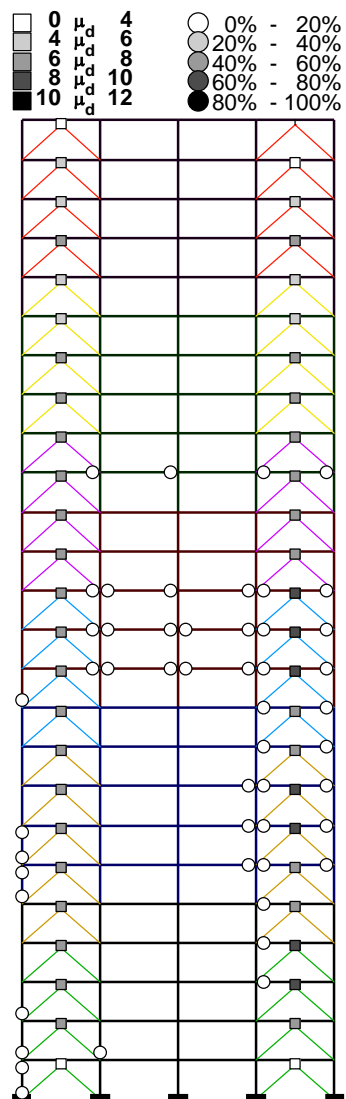
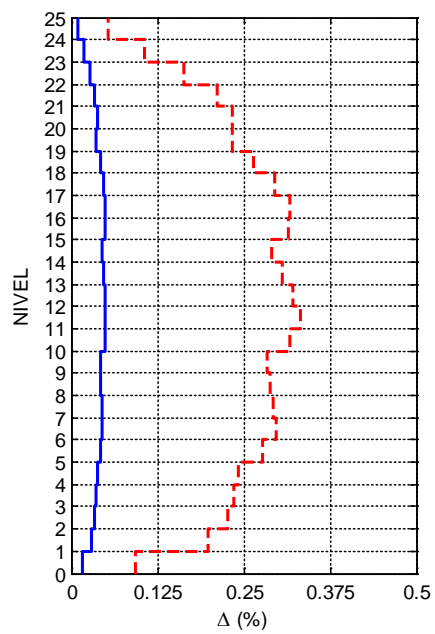
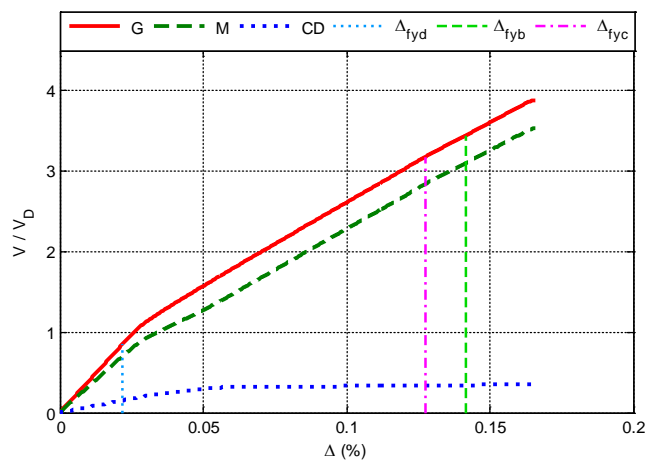


Figura A.304 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

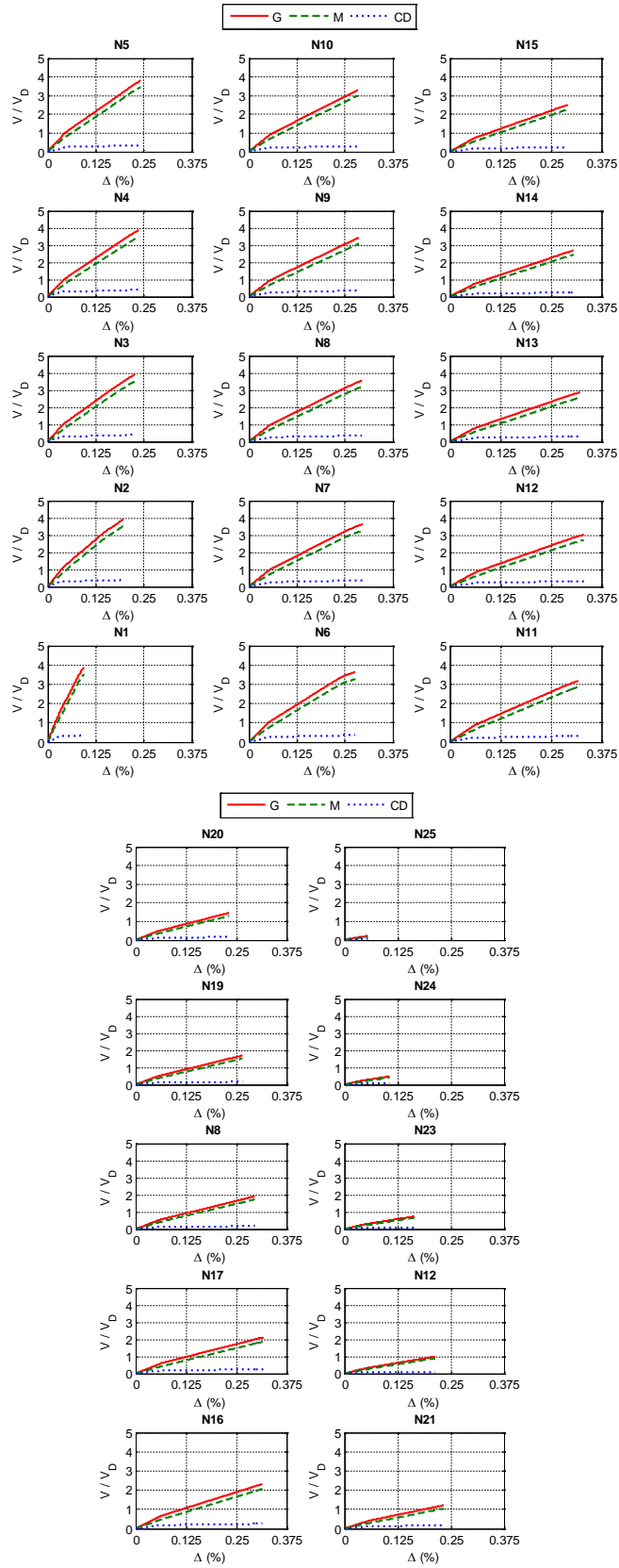


Figura A.305 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.306 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

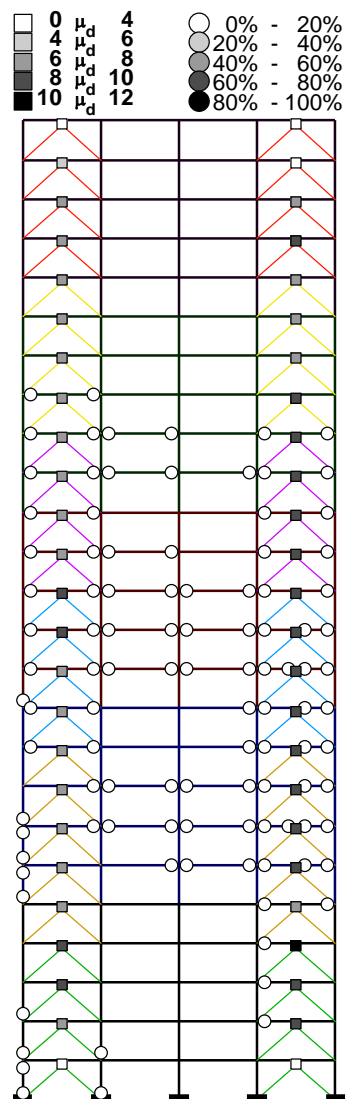
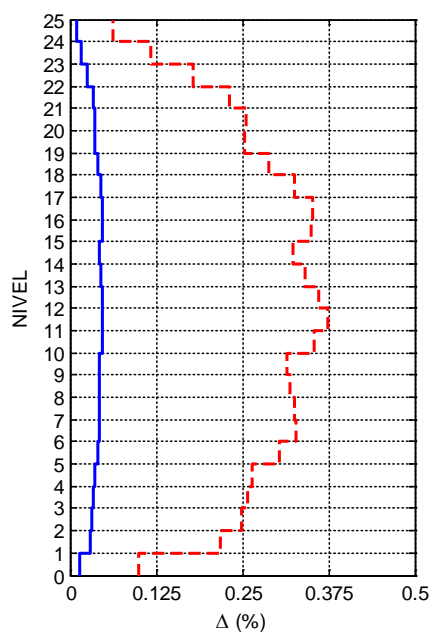
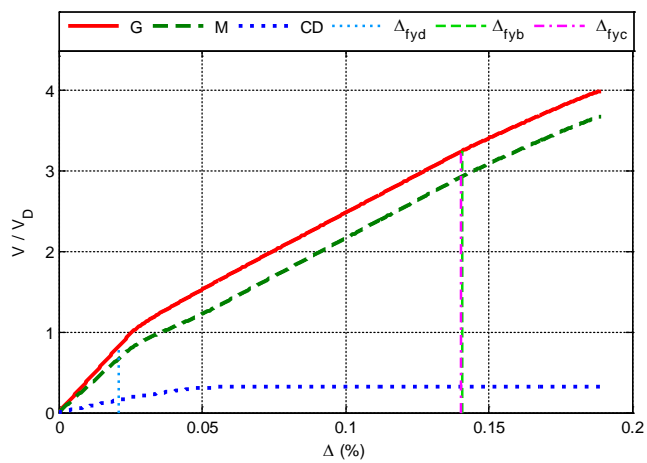


Figura A.307 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

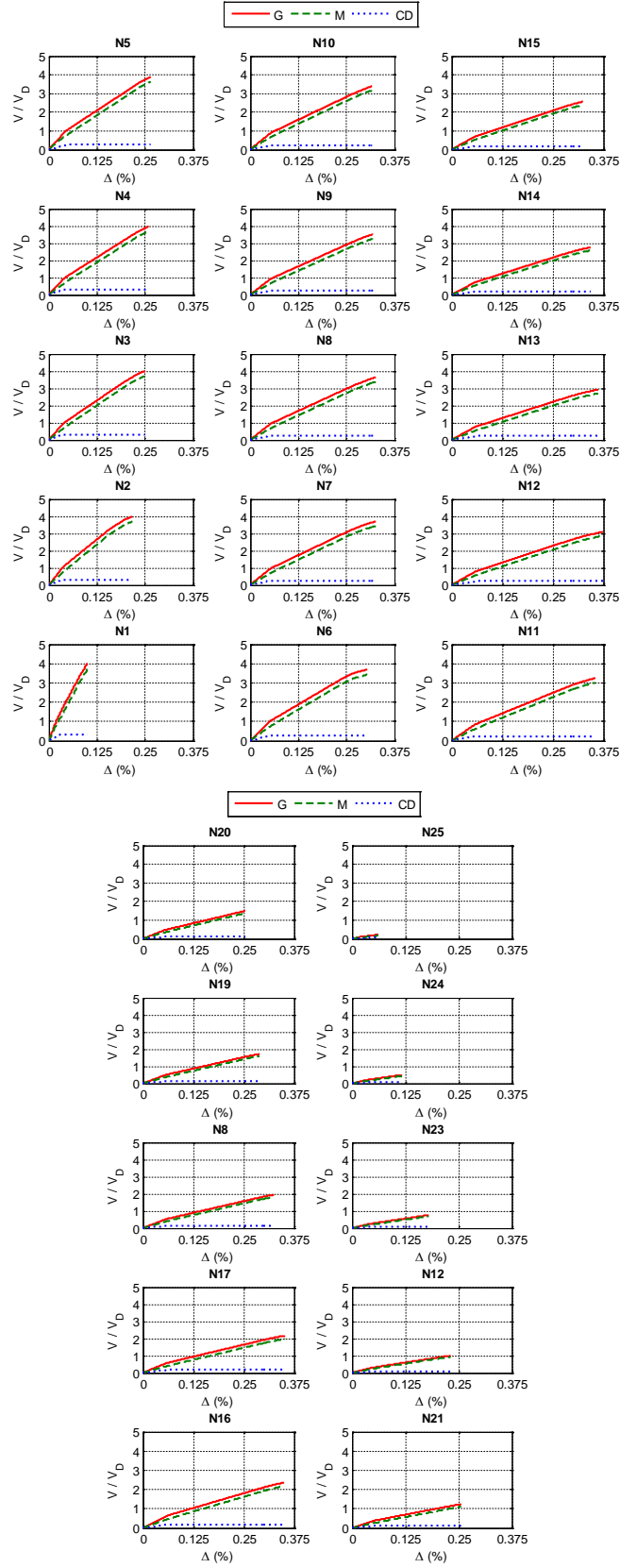


Figura A.308 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

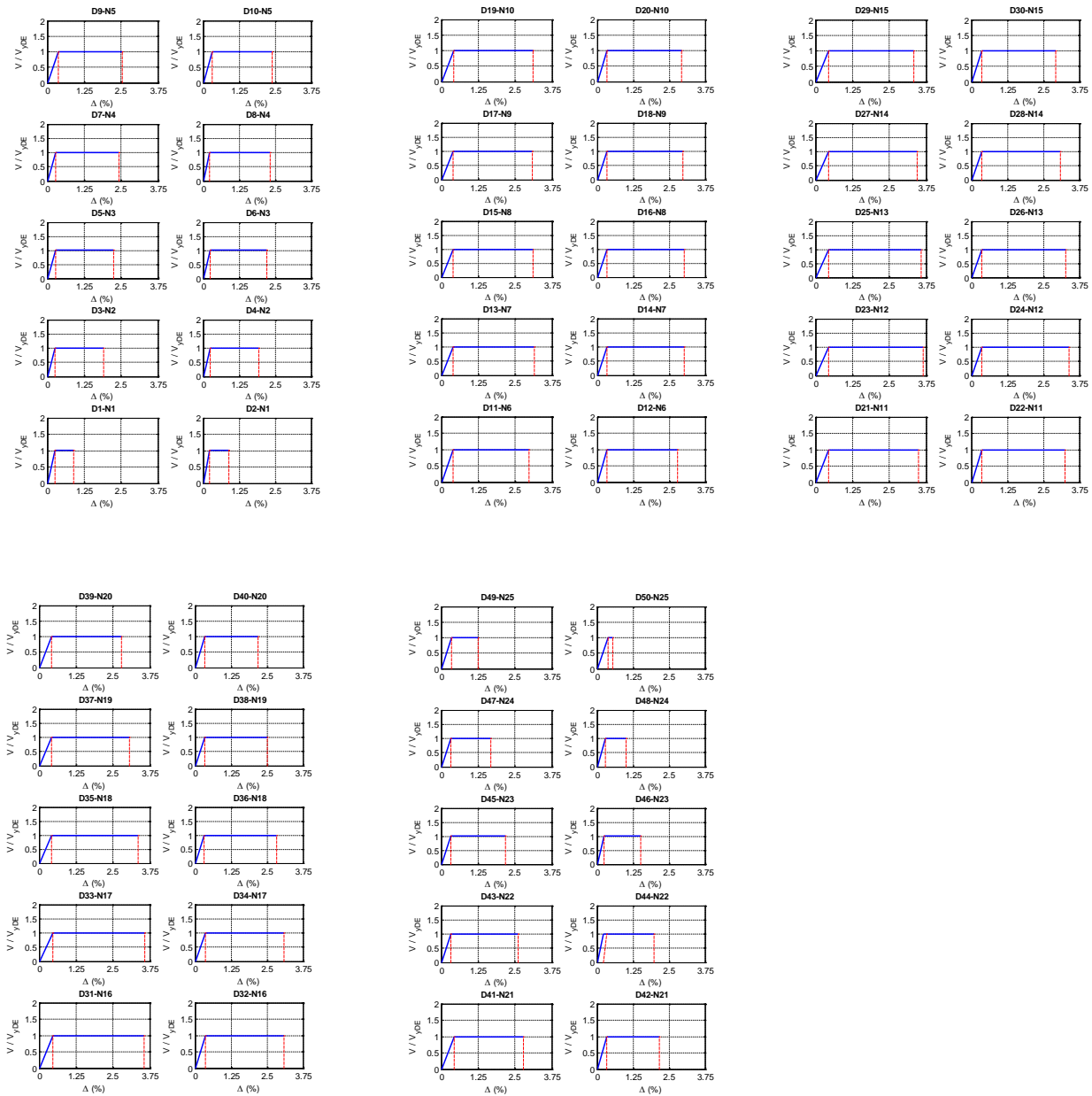


Figura A.309 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

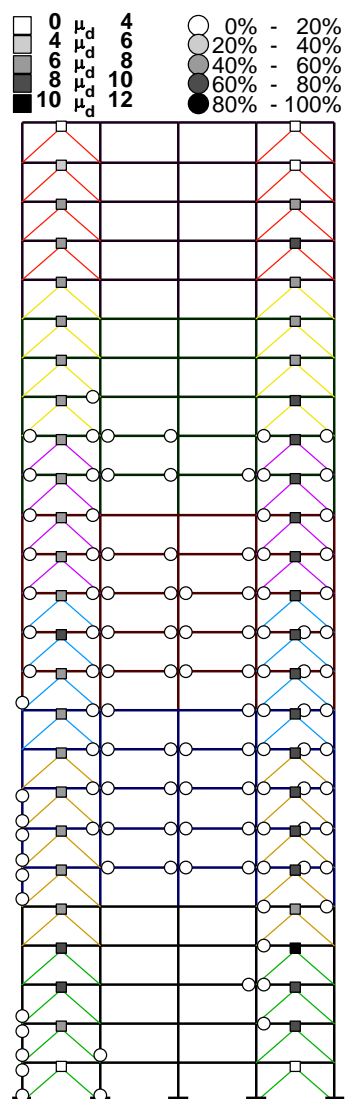
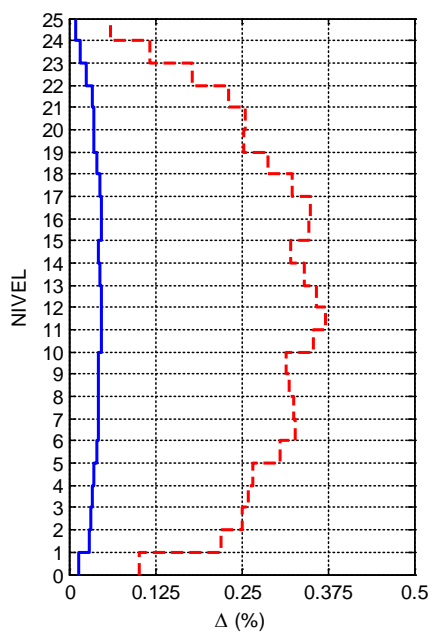
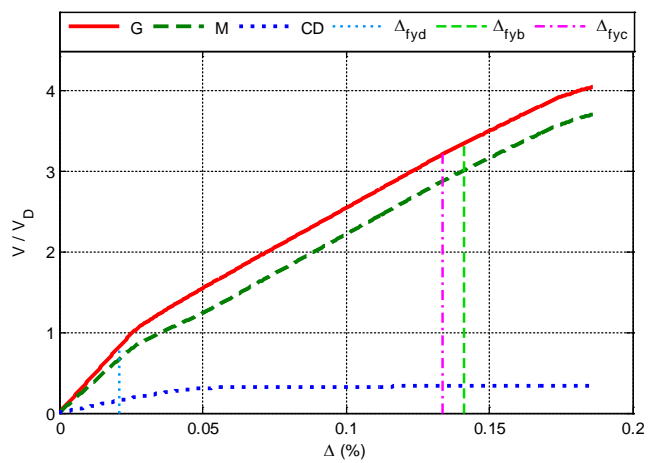


Figura A.310 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

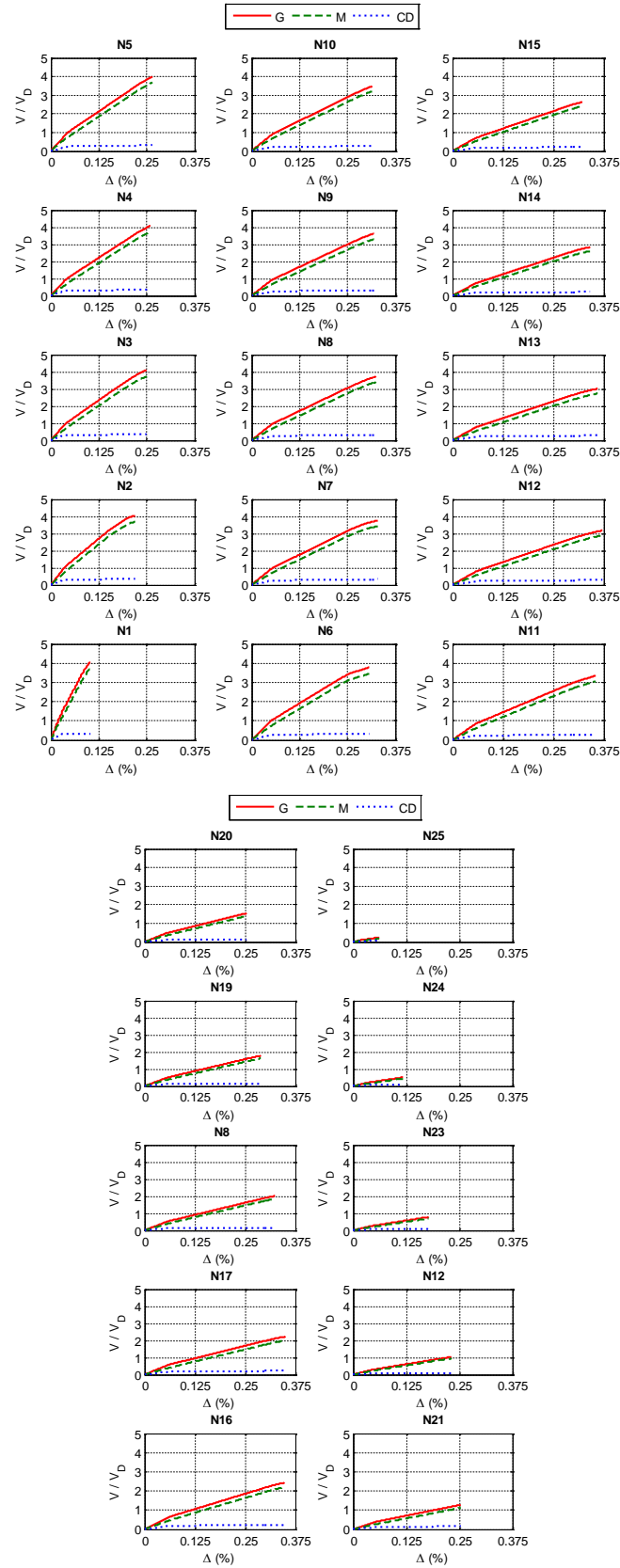


Figura A.311 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

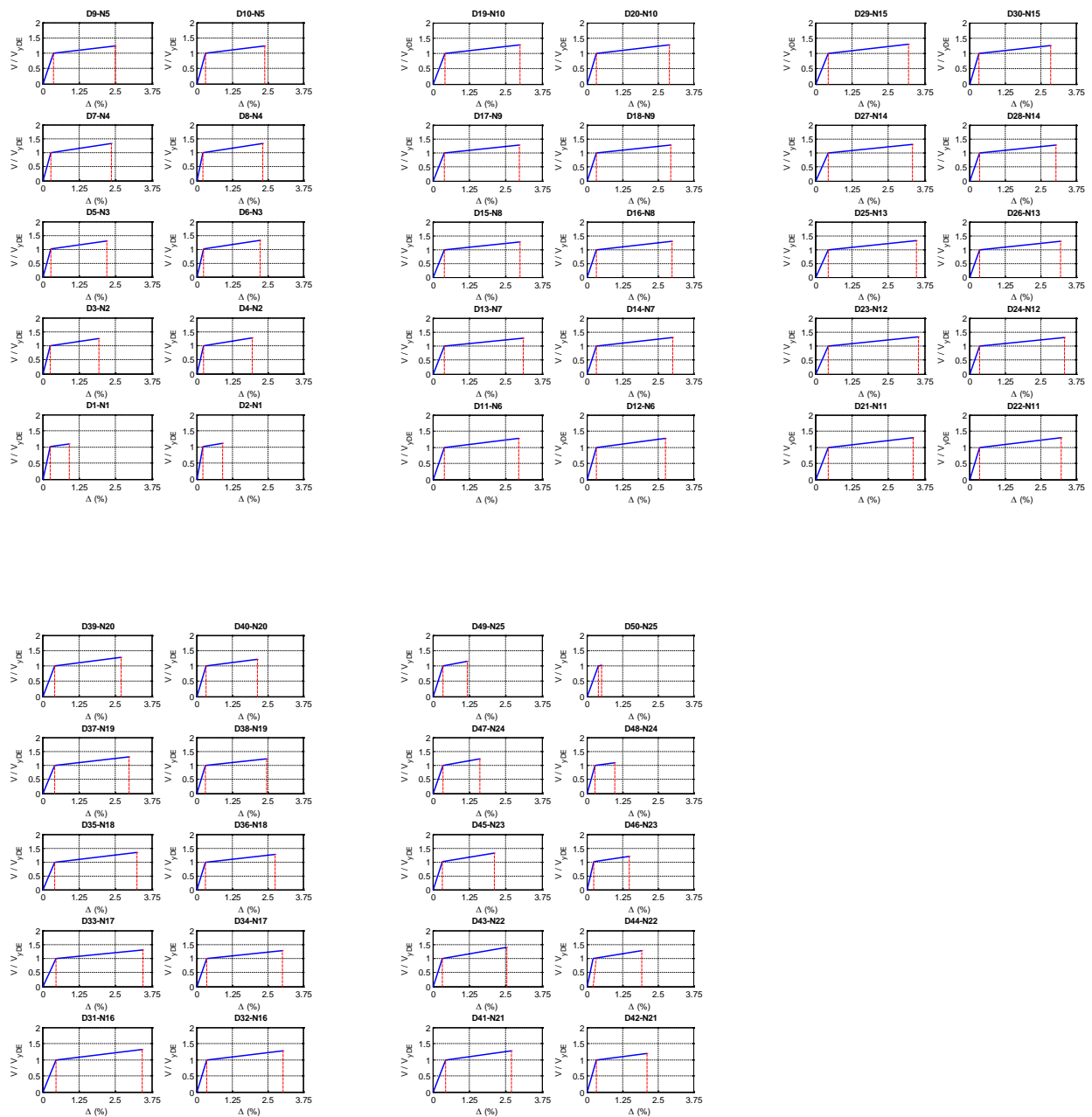


Figura A.312 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

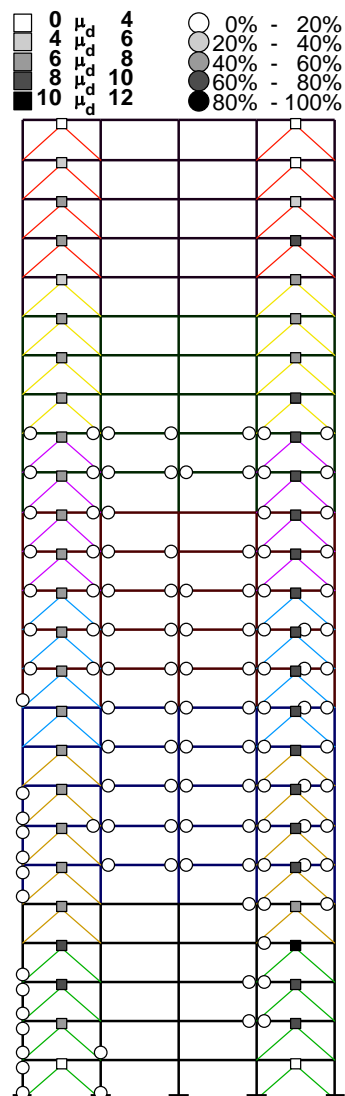
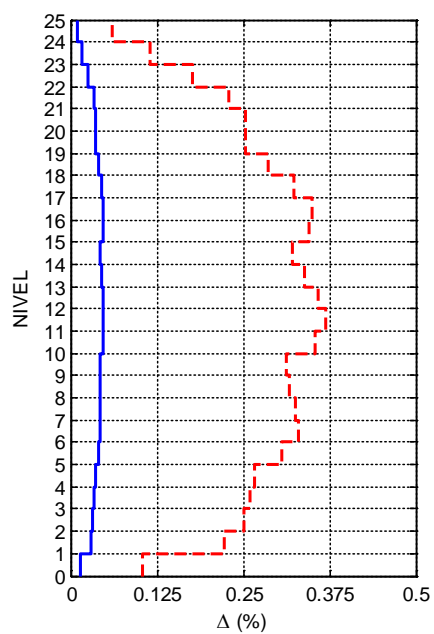
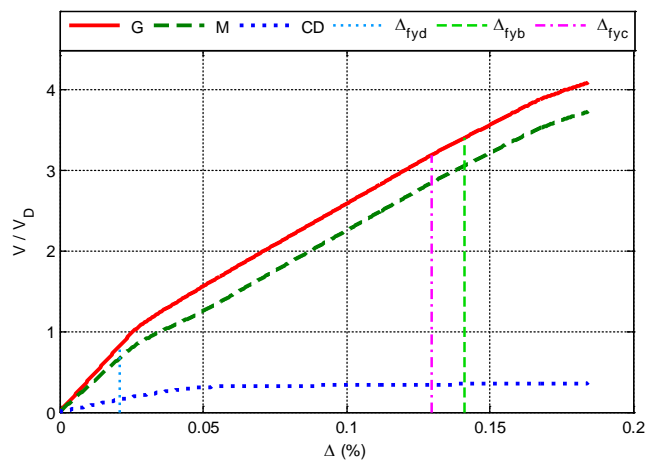


Figura A.313 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

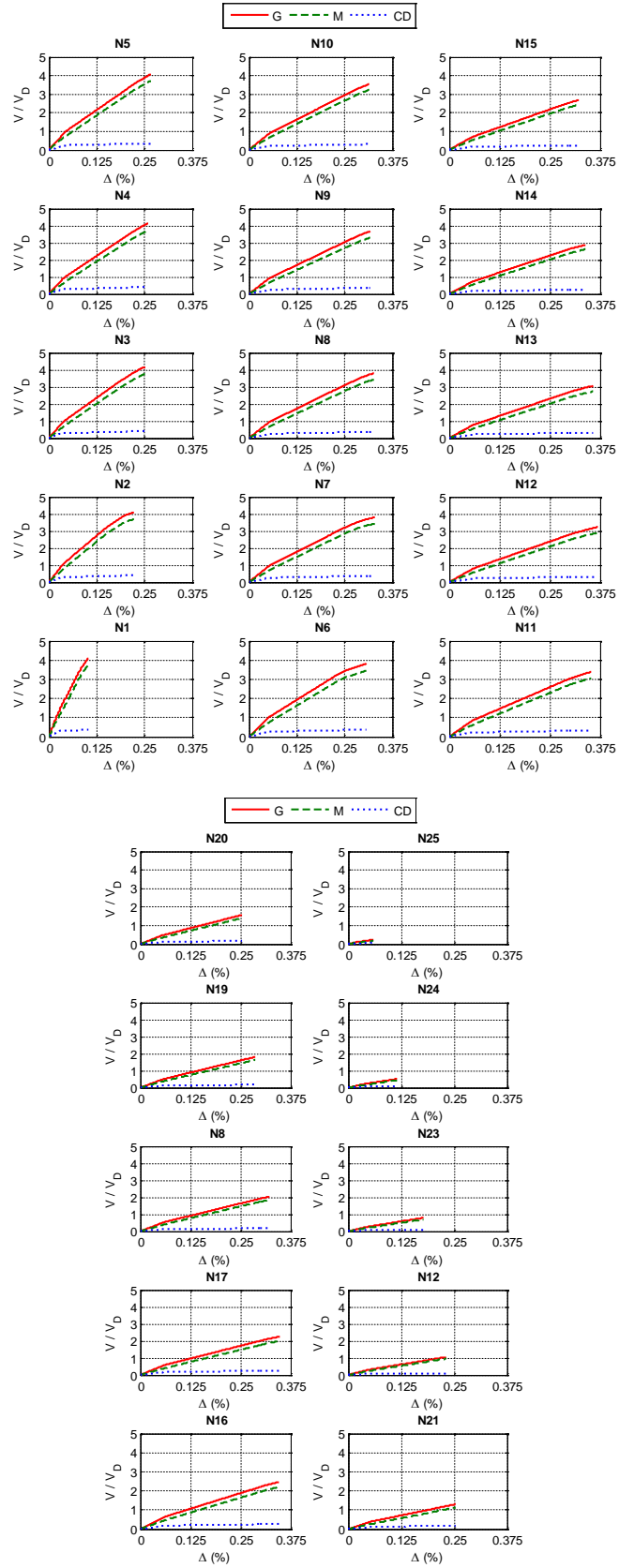


Figura A.314 $N = 25$, $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

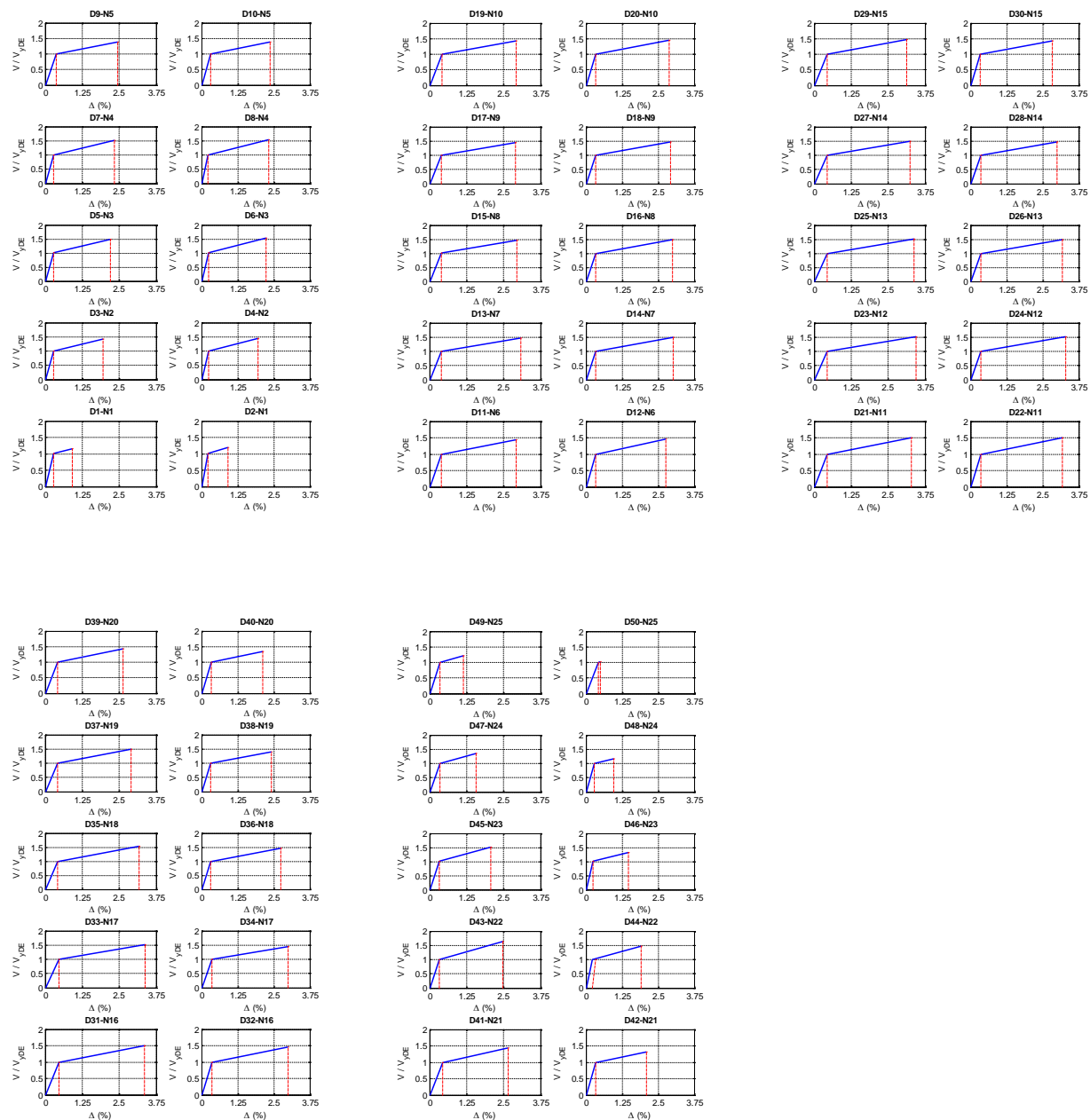


Figura A.315 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

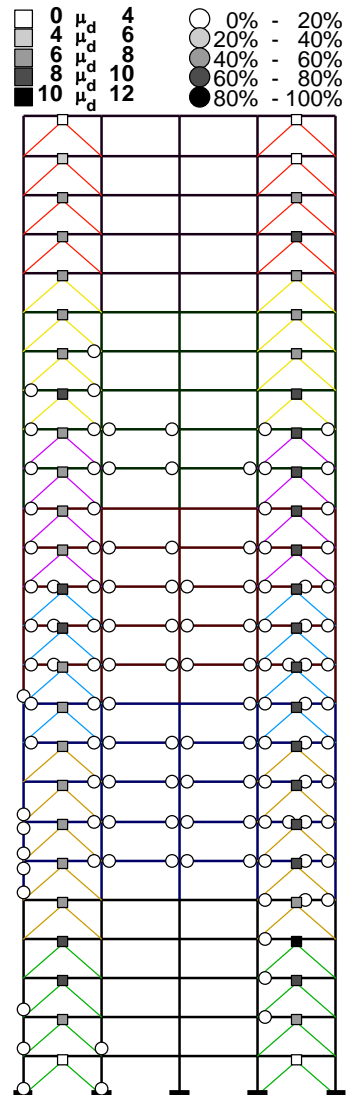
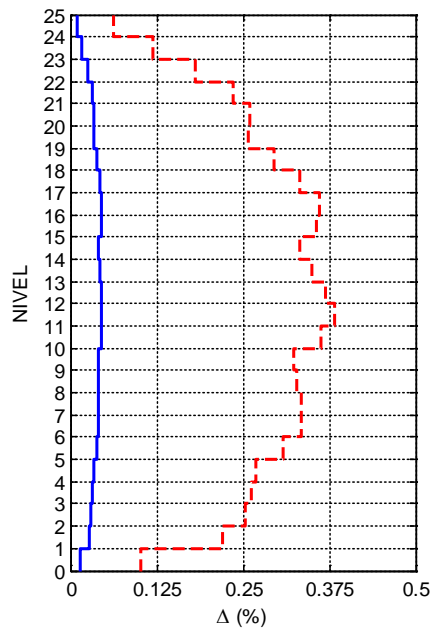
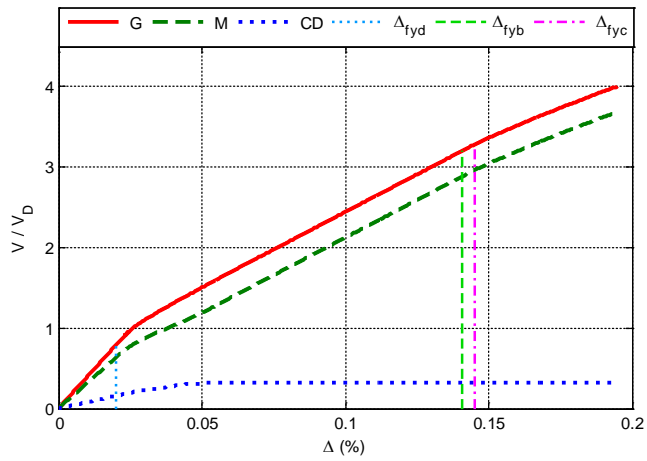


Figura A.316 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

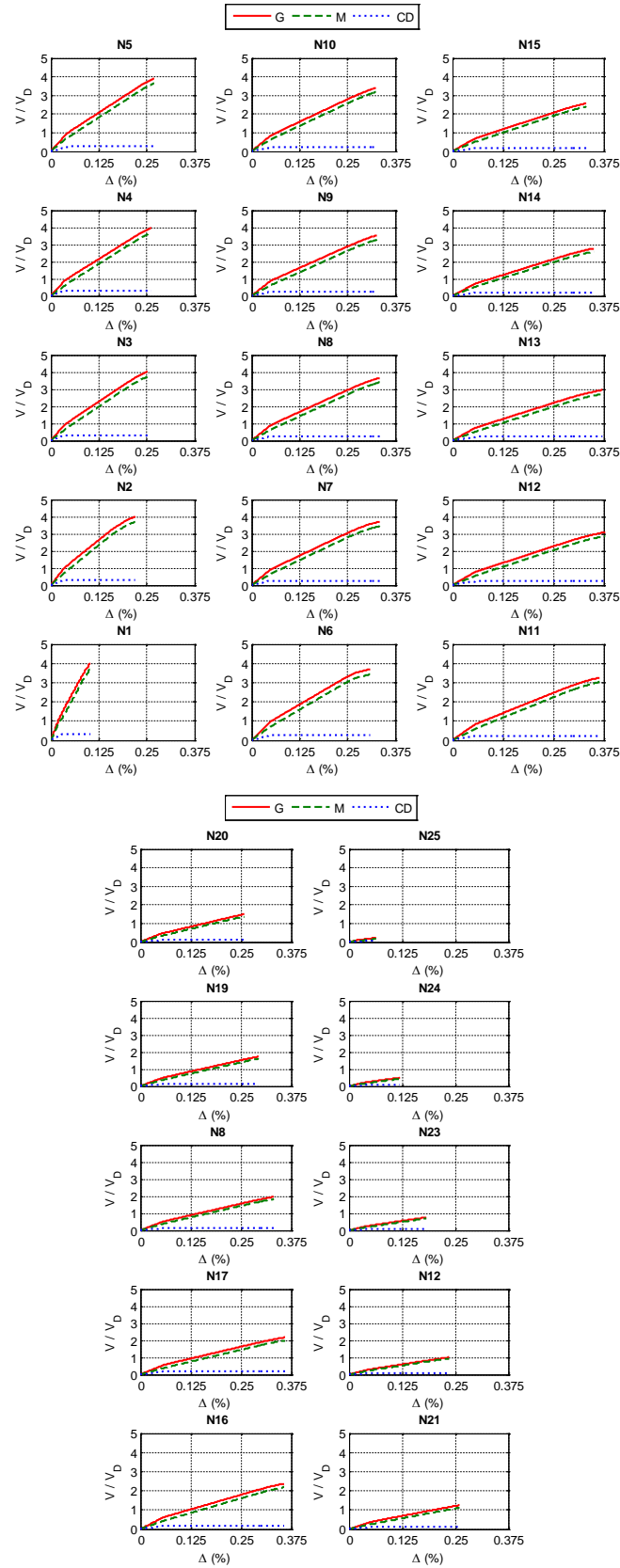


Figura A.317 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

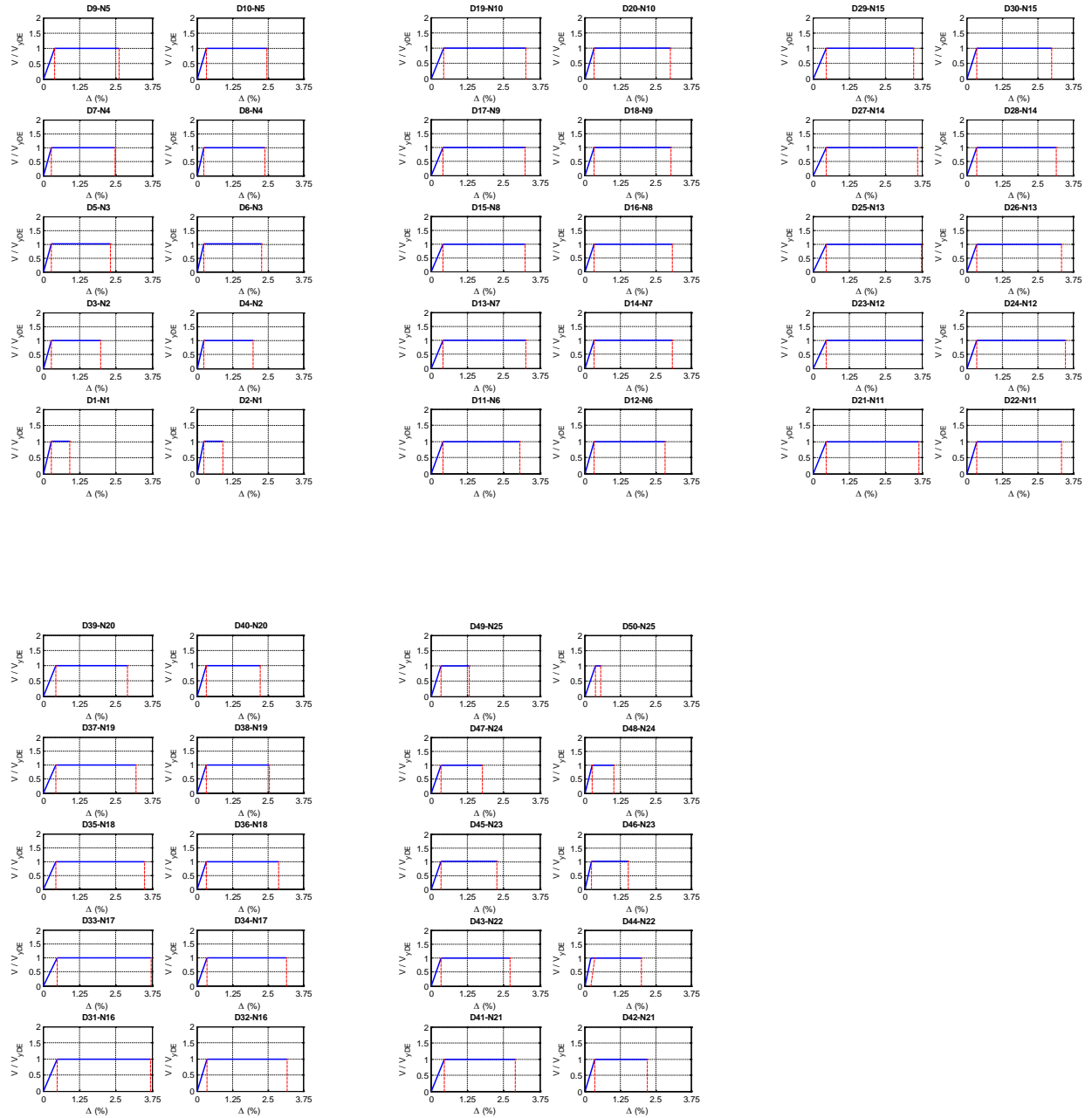


Figura A.318 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

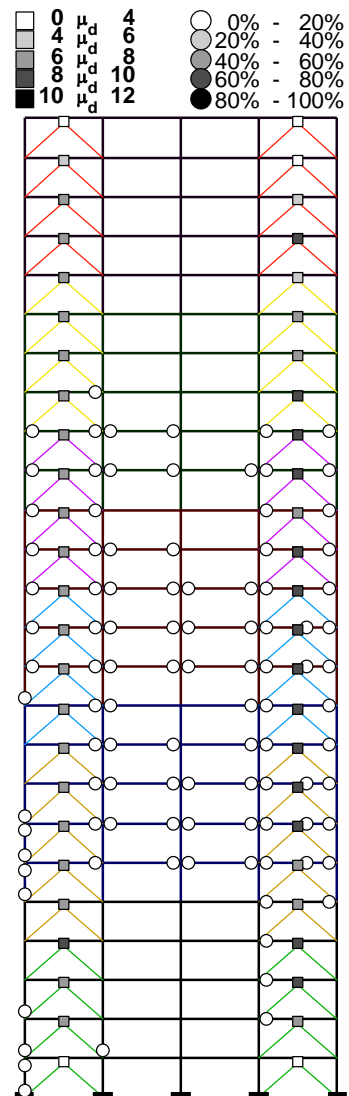
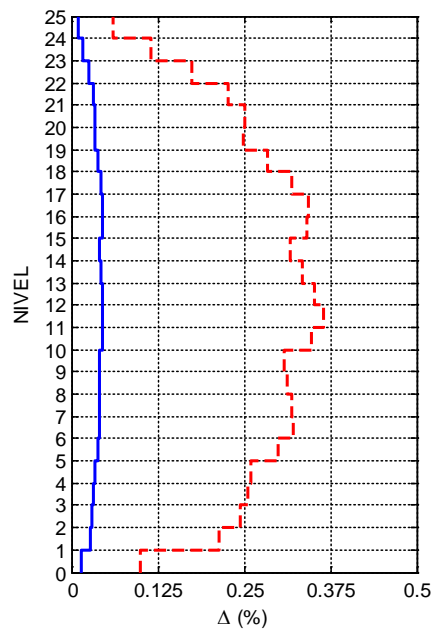
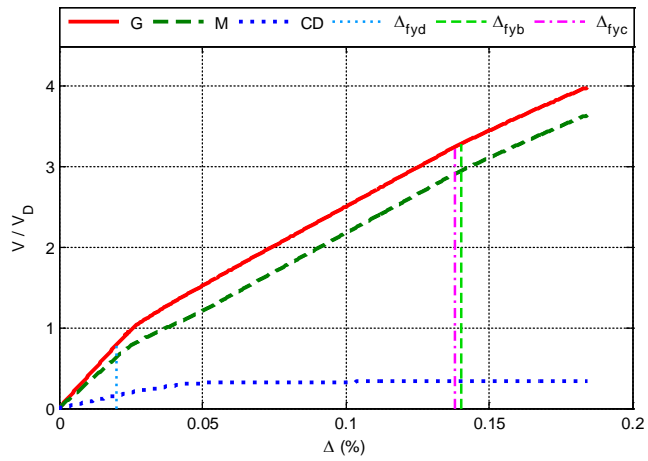


Figura A.319 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

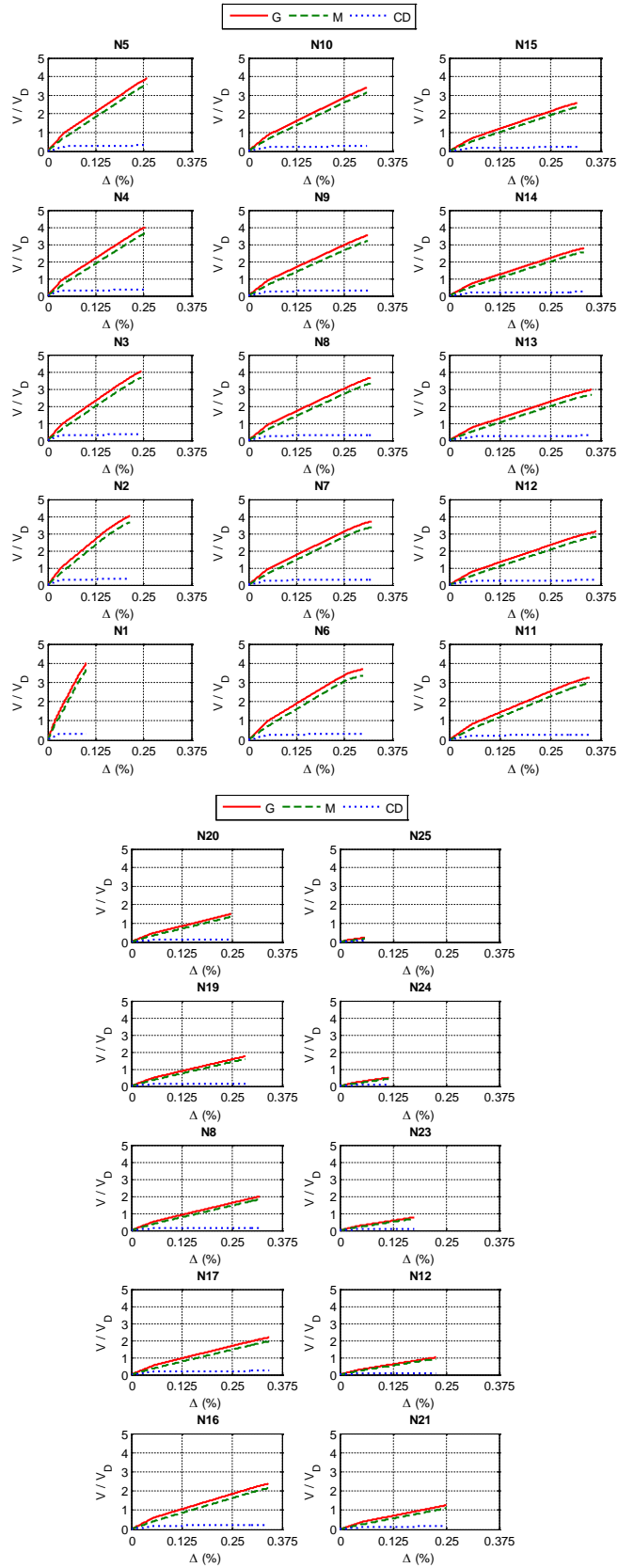


Figura A.320 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

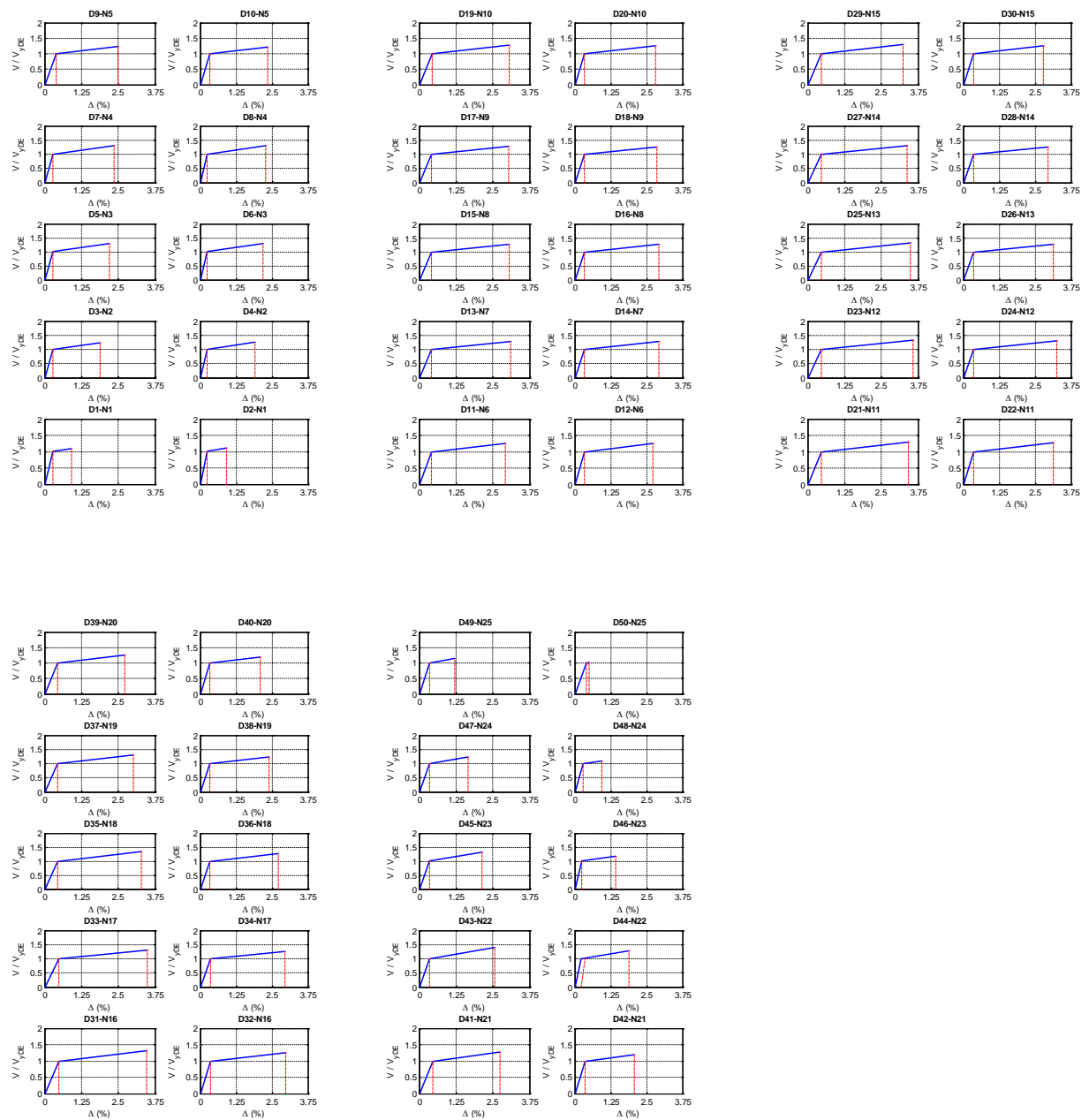


Figura A.321 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

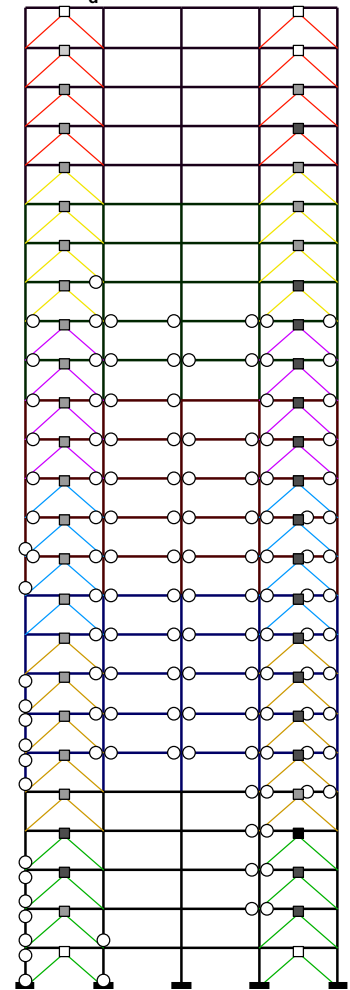
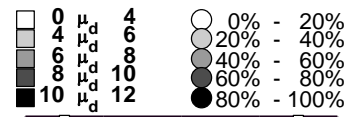


Figura A.322 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

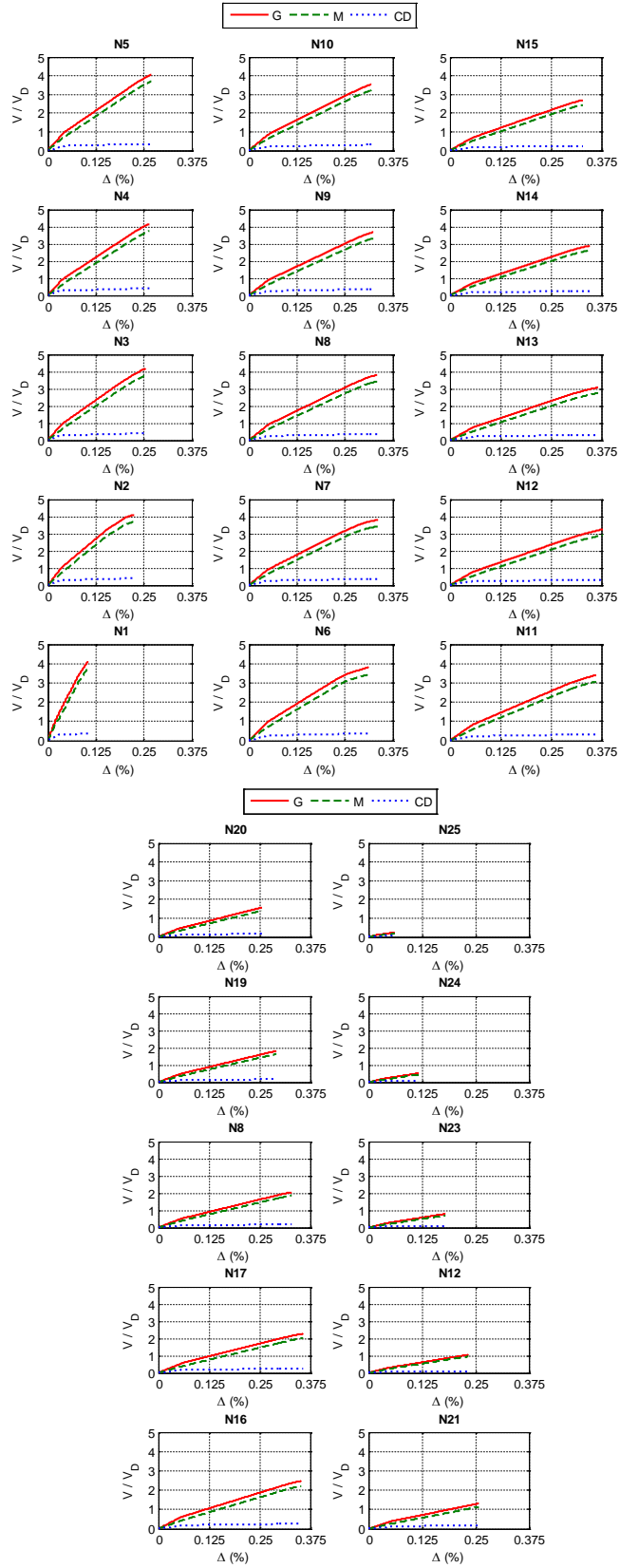


Figura A.323 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

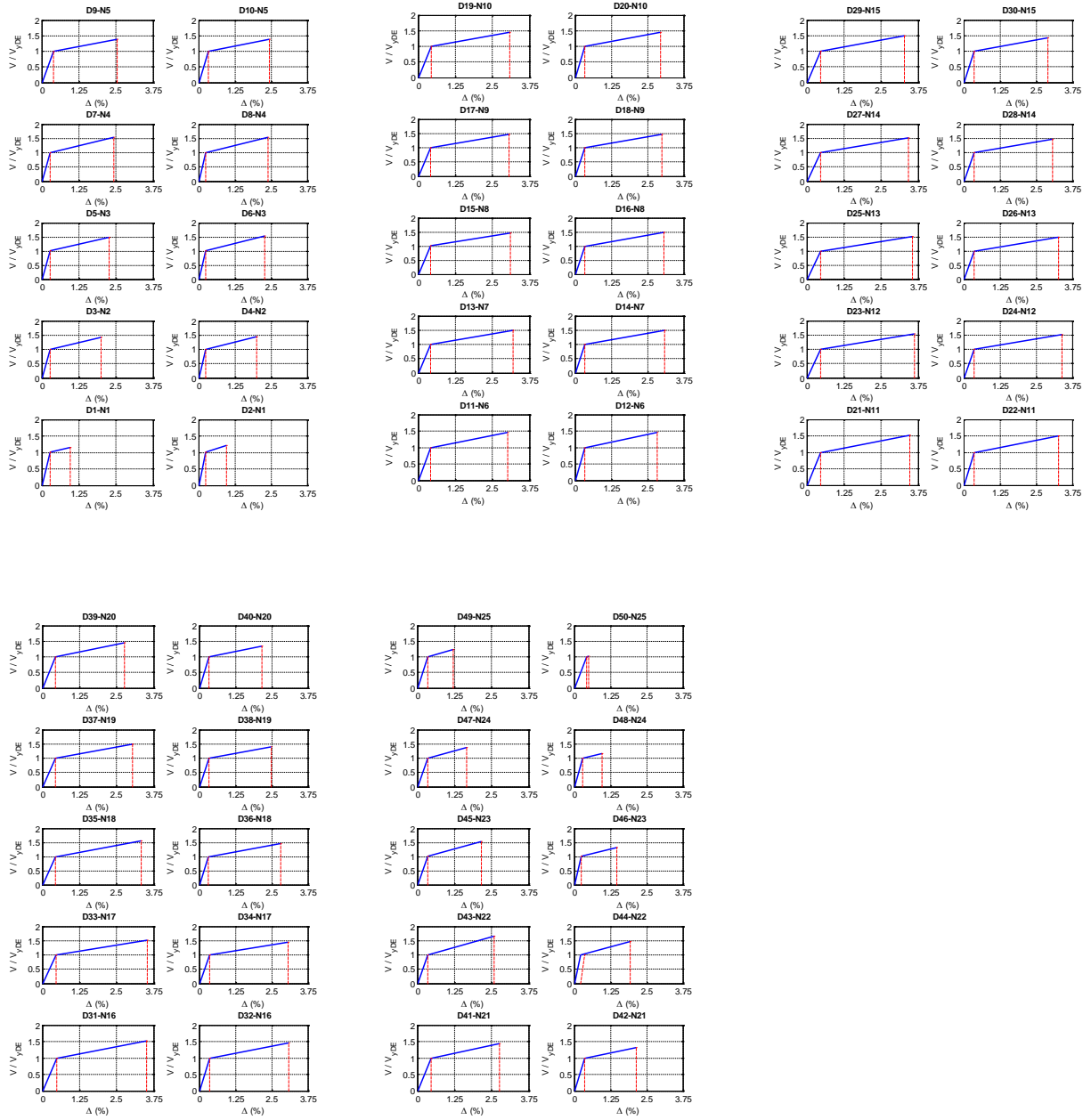


Figura A.324 $N = 25, \alpha = 0.75, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

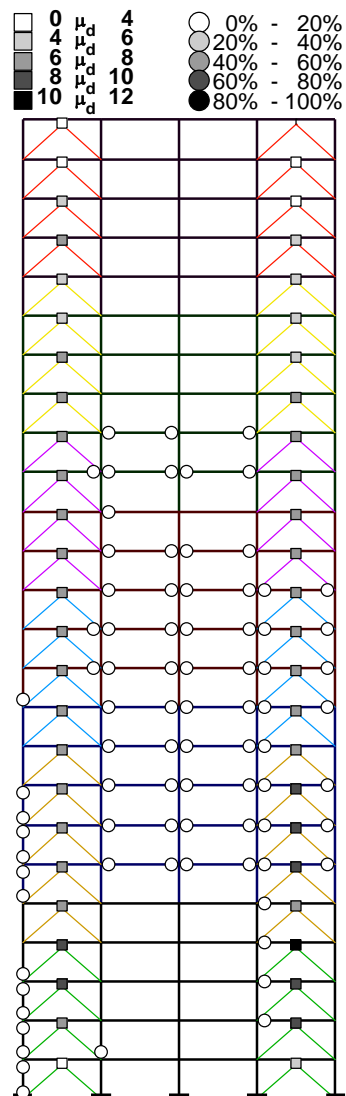
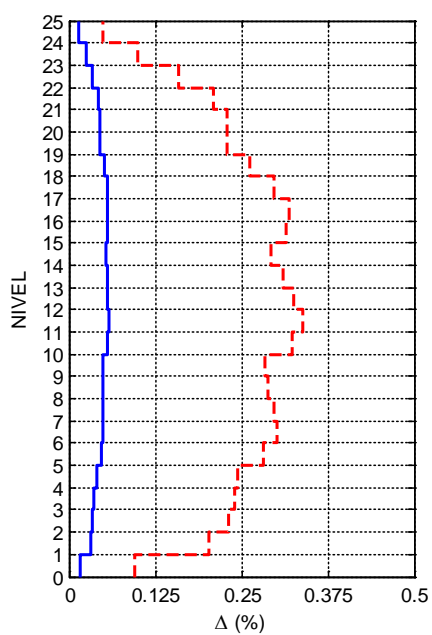
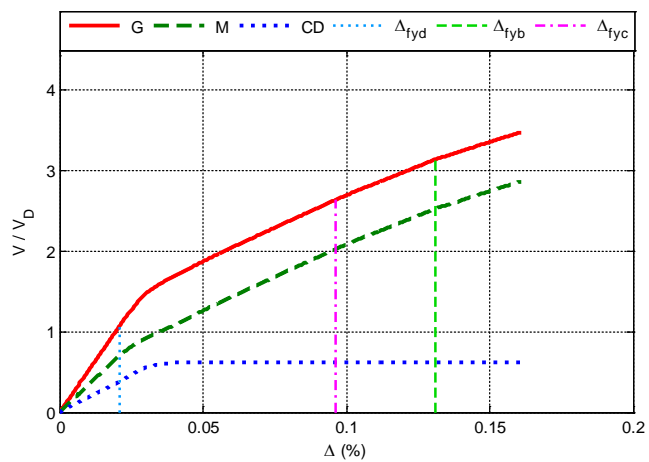


Figura A.325 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

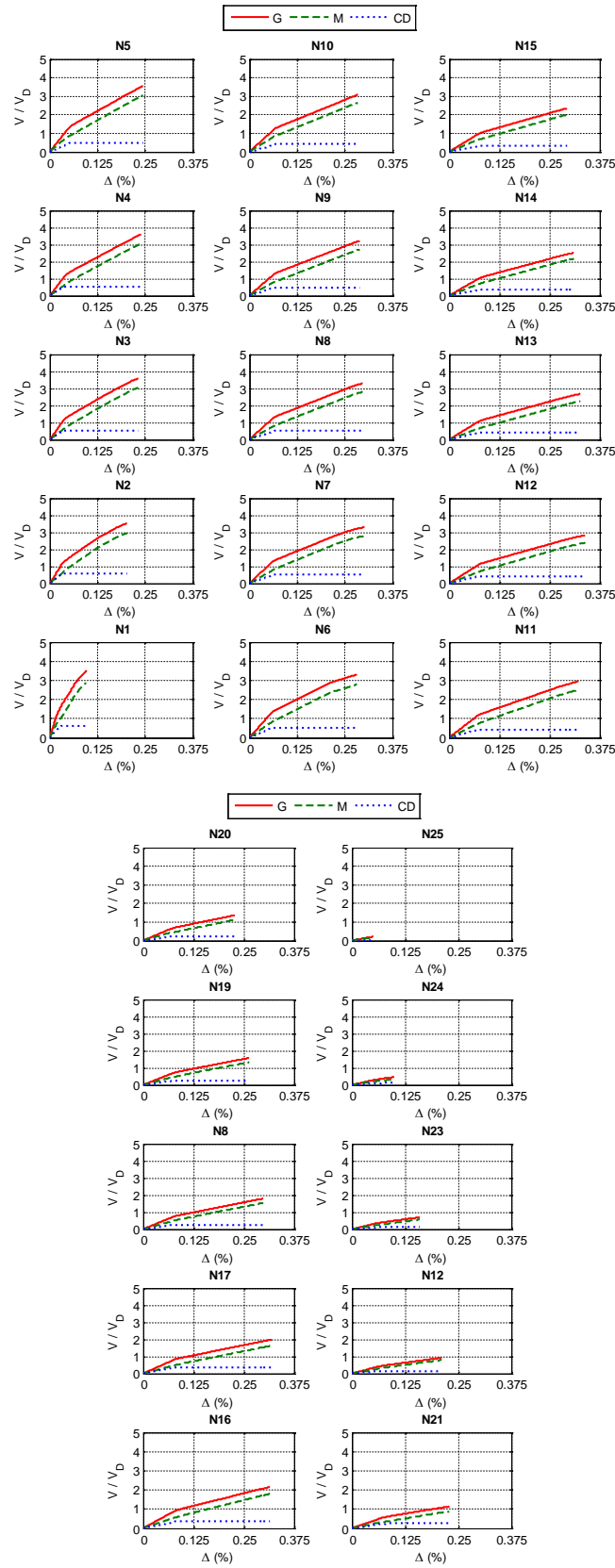


Figura A.326 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

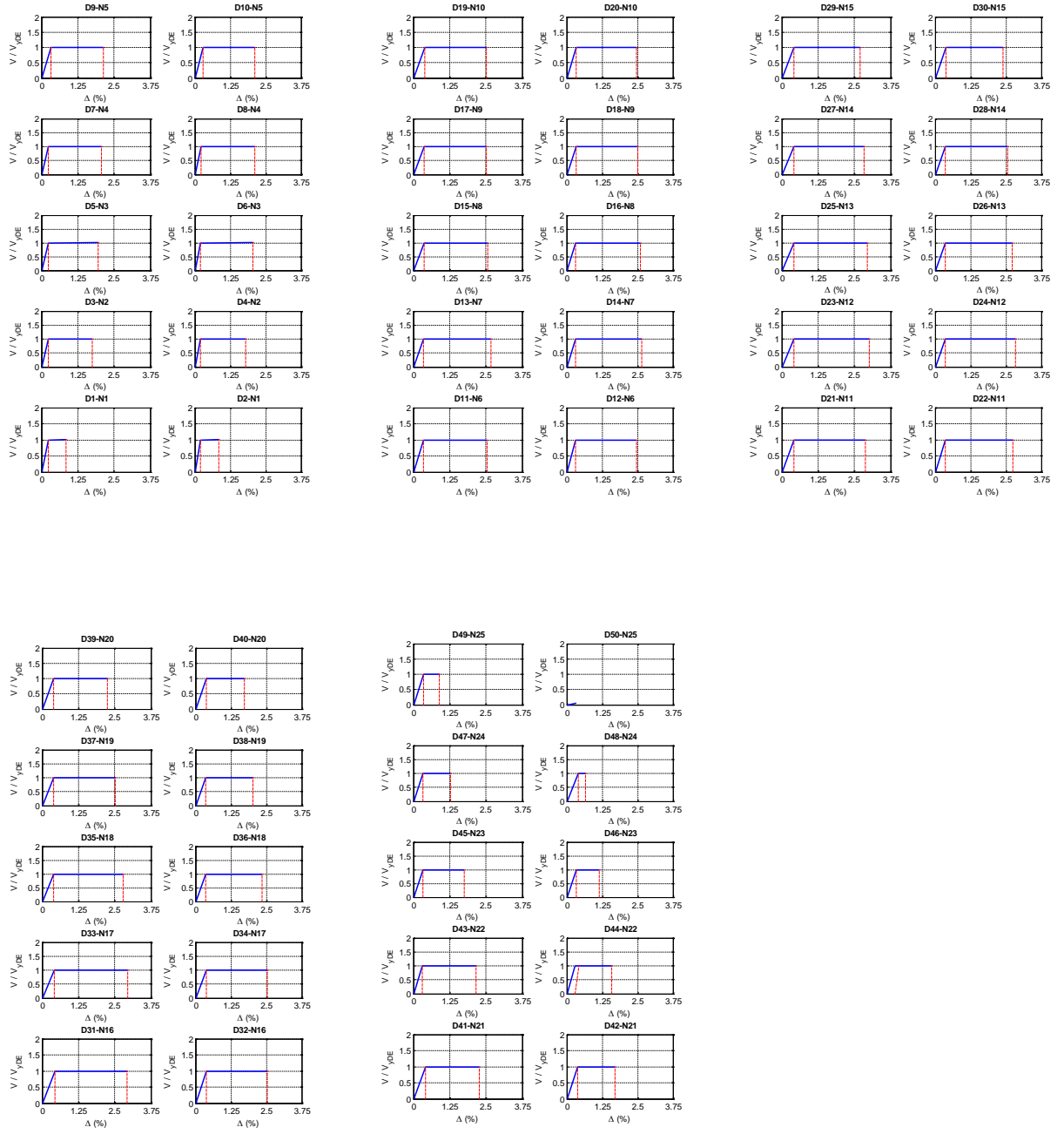


Figura A.327 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

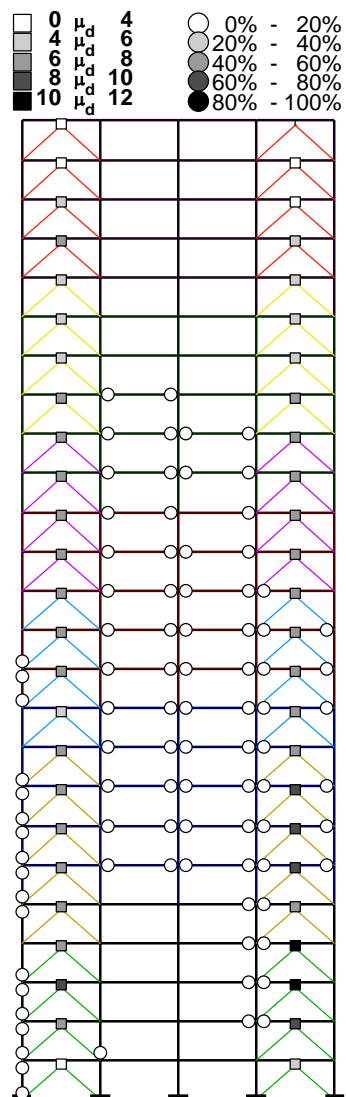
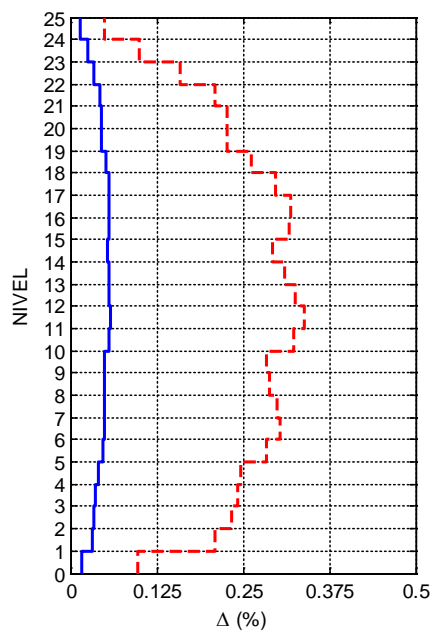
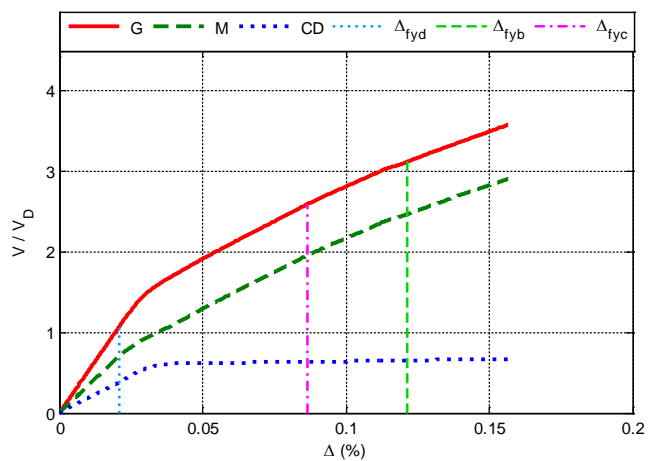


Figura A.328 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

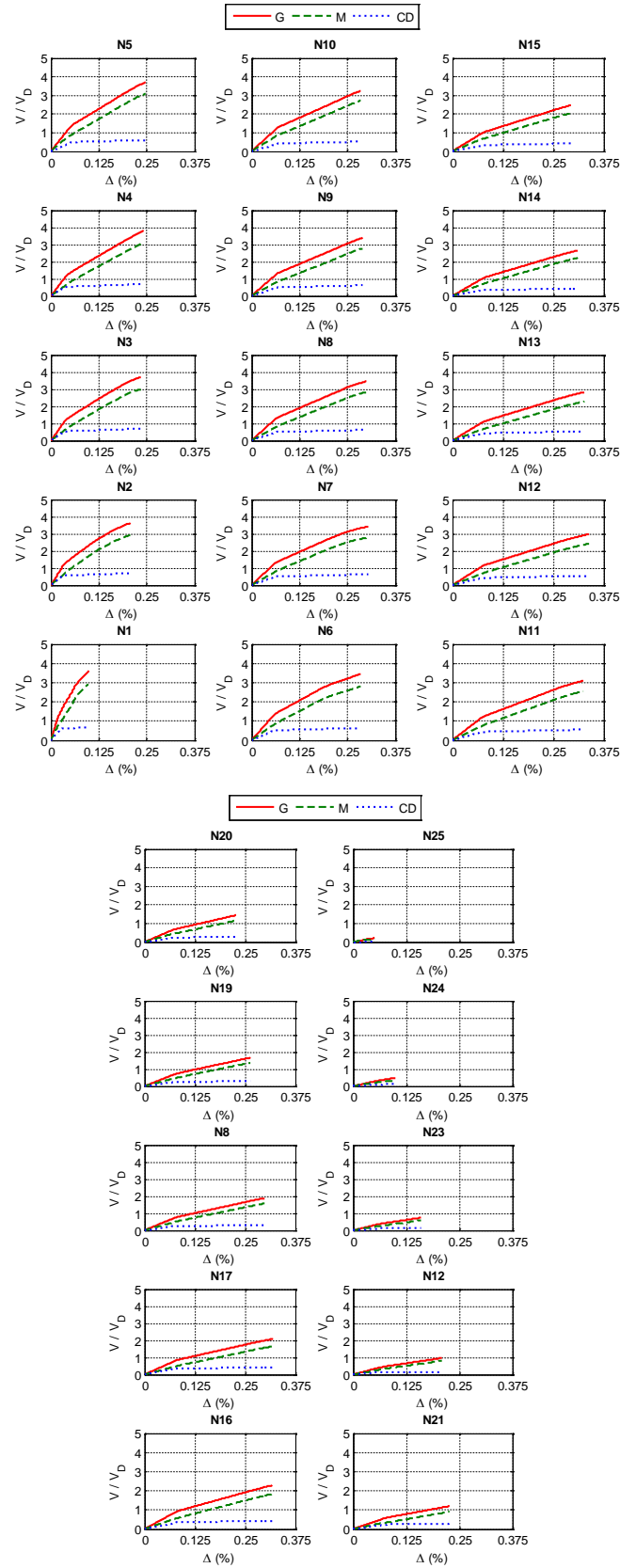


Figura A.329 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

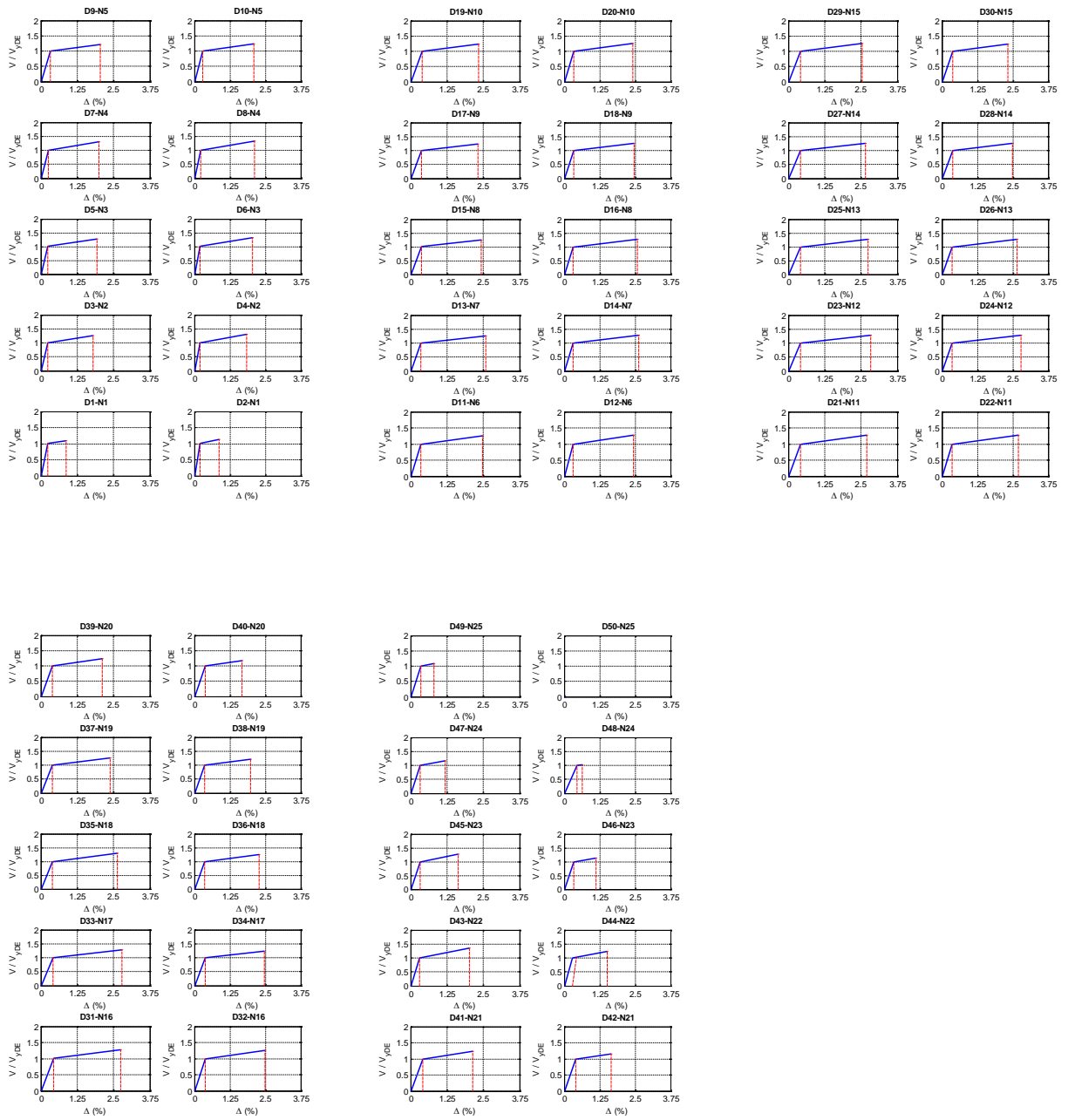


Figura A.330 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

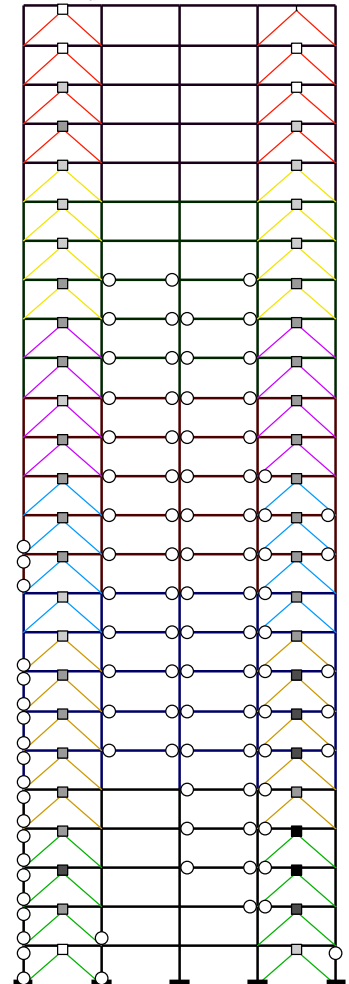
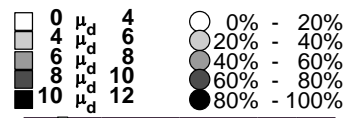
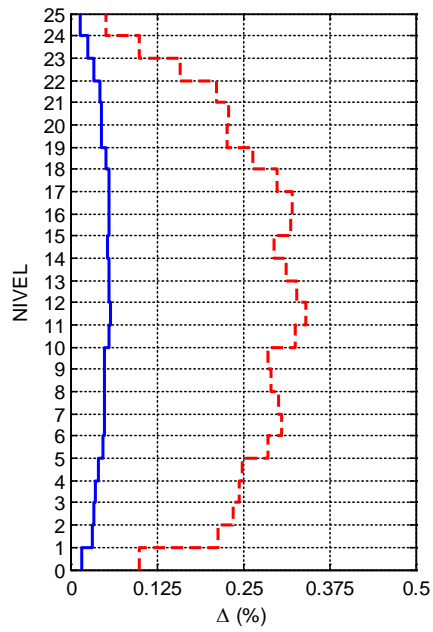
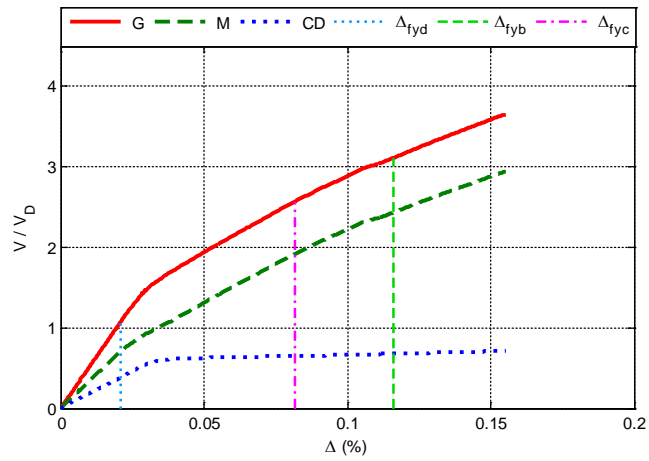


Figura A.331 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

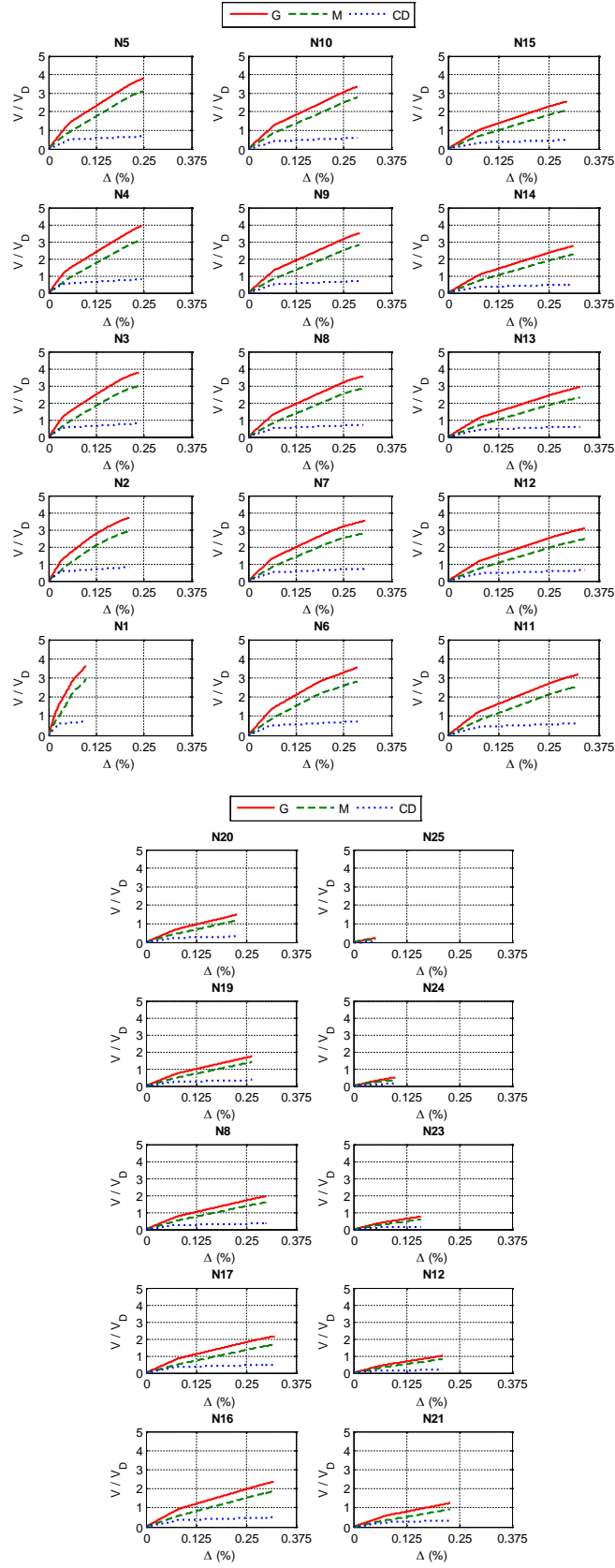


Figura A.332 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.333 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

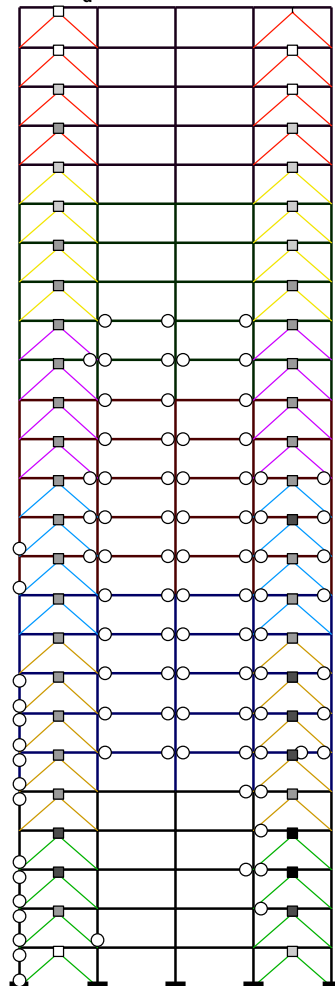
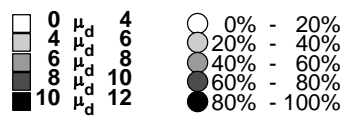
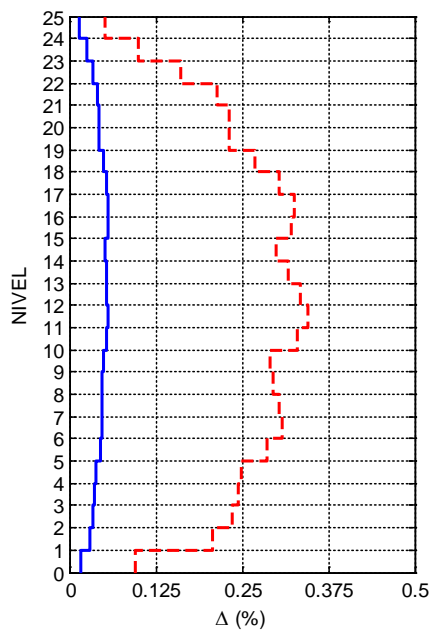
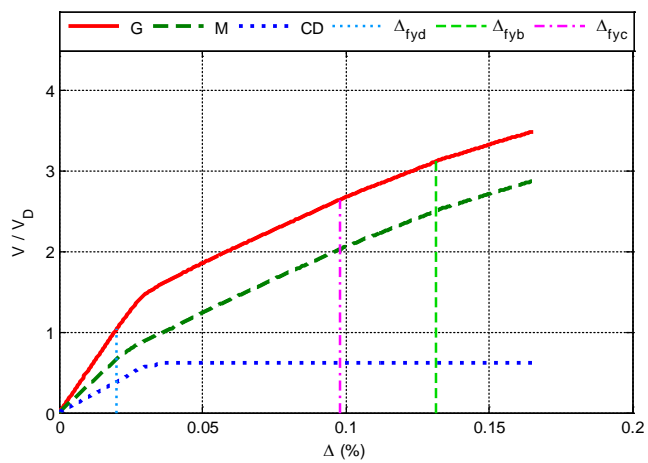


Figura A.334 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

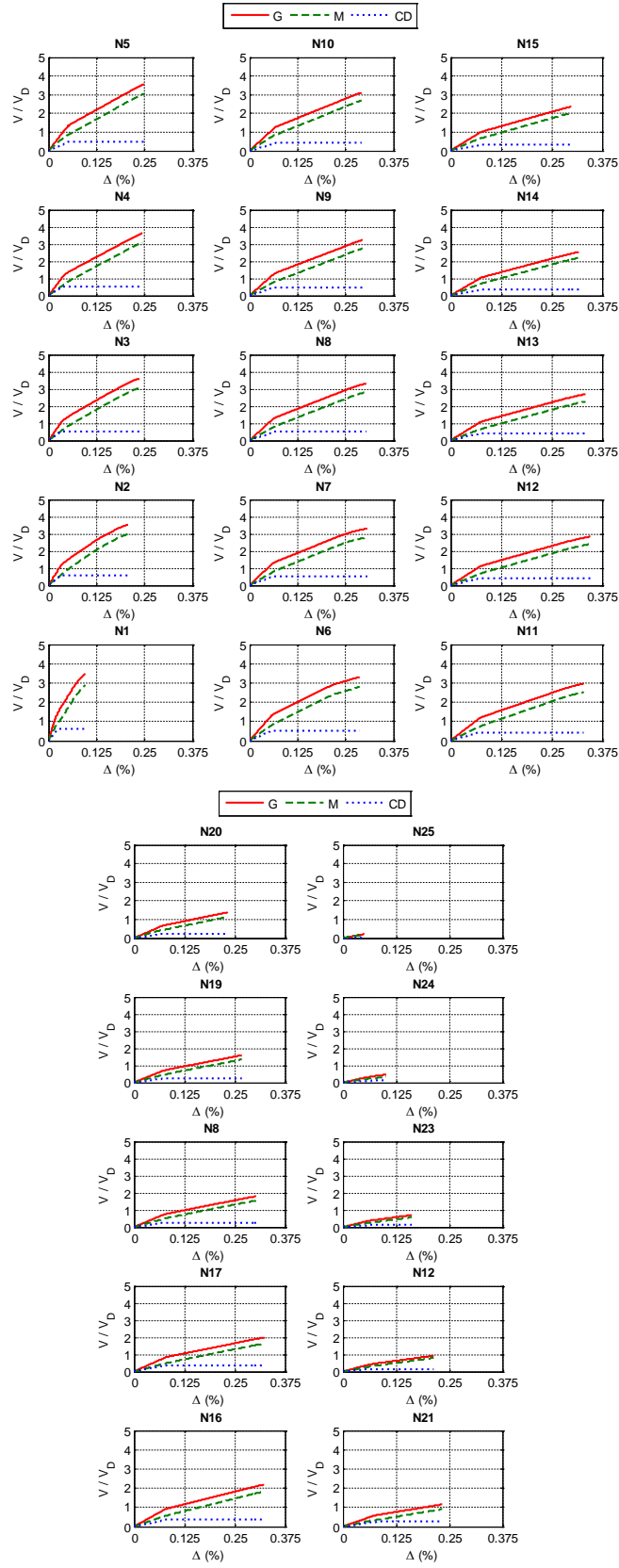


Figura A.335 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

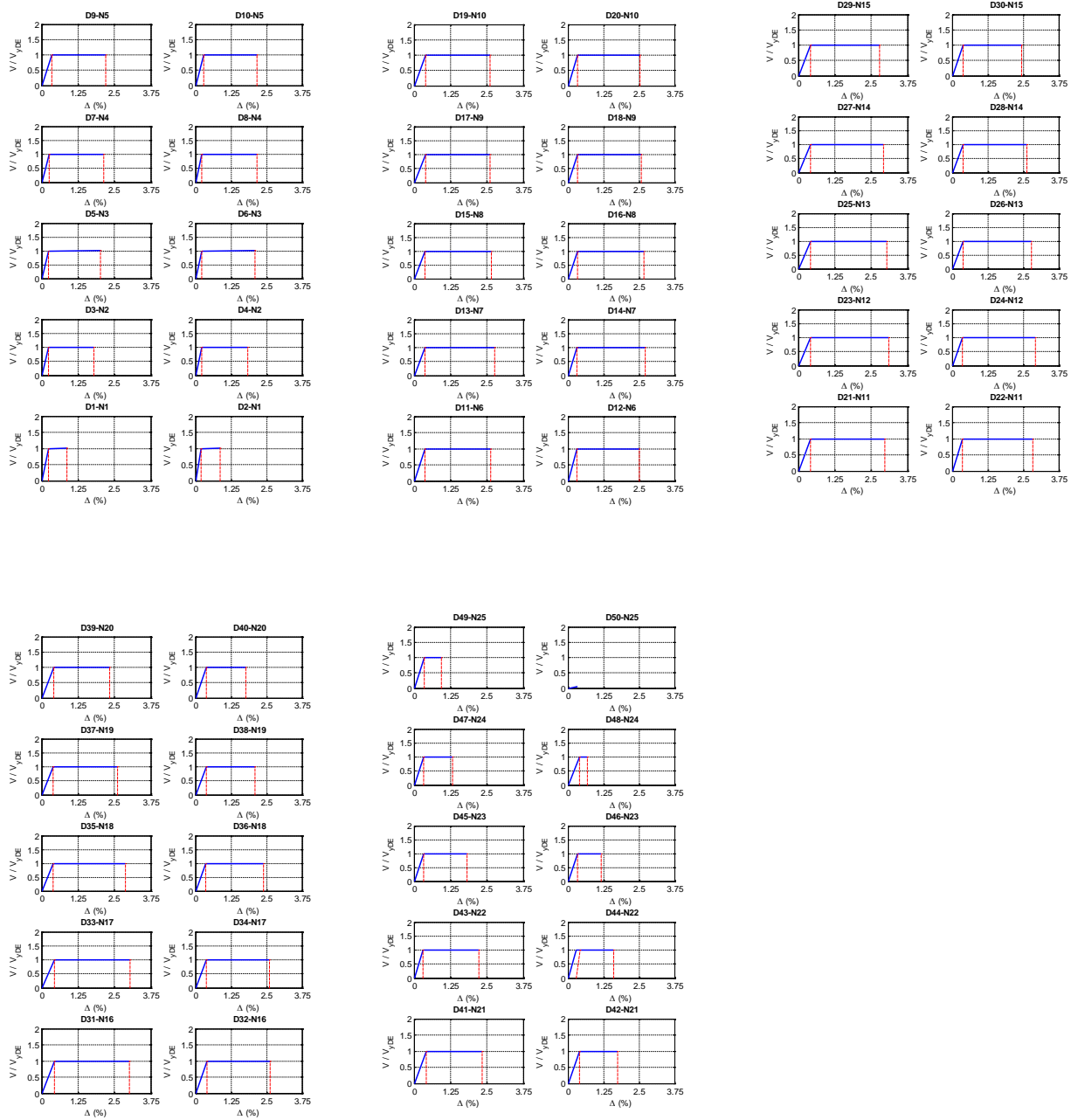


Figura A.336 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

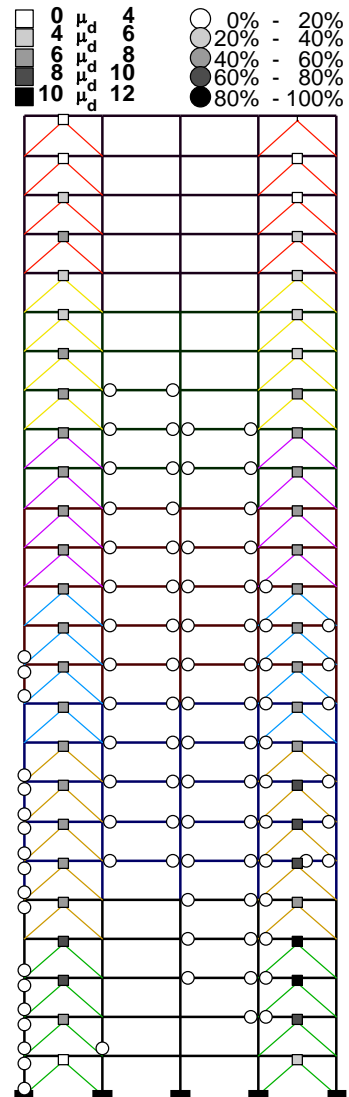
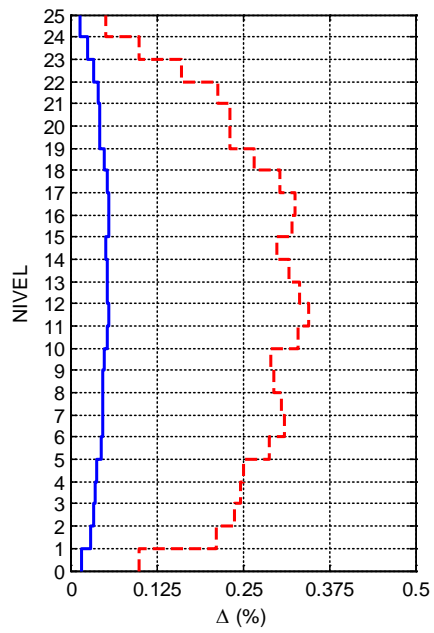
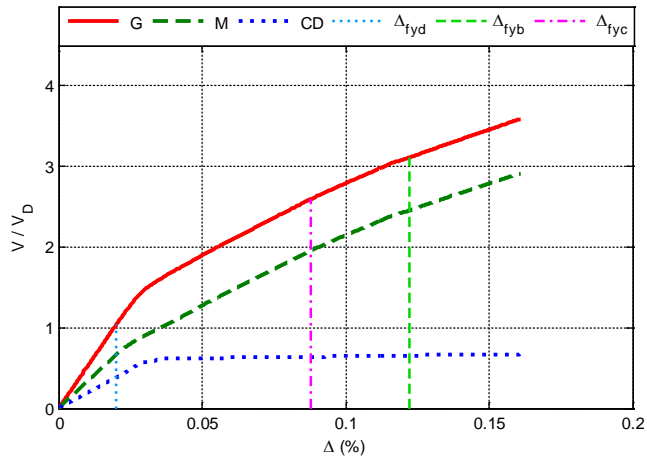


Figura A.337 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

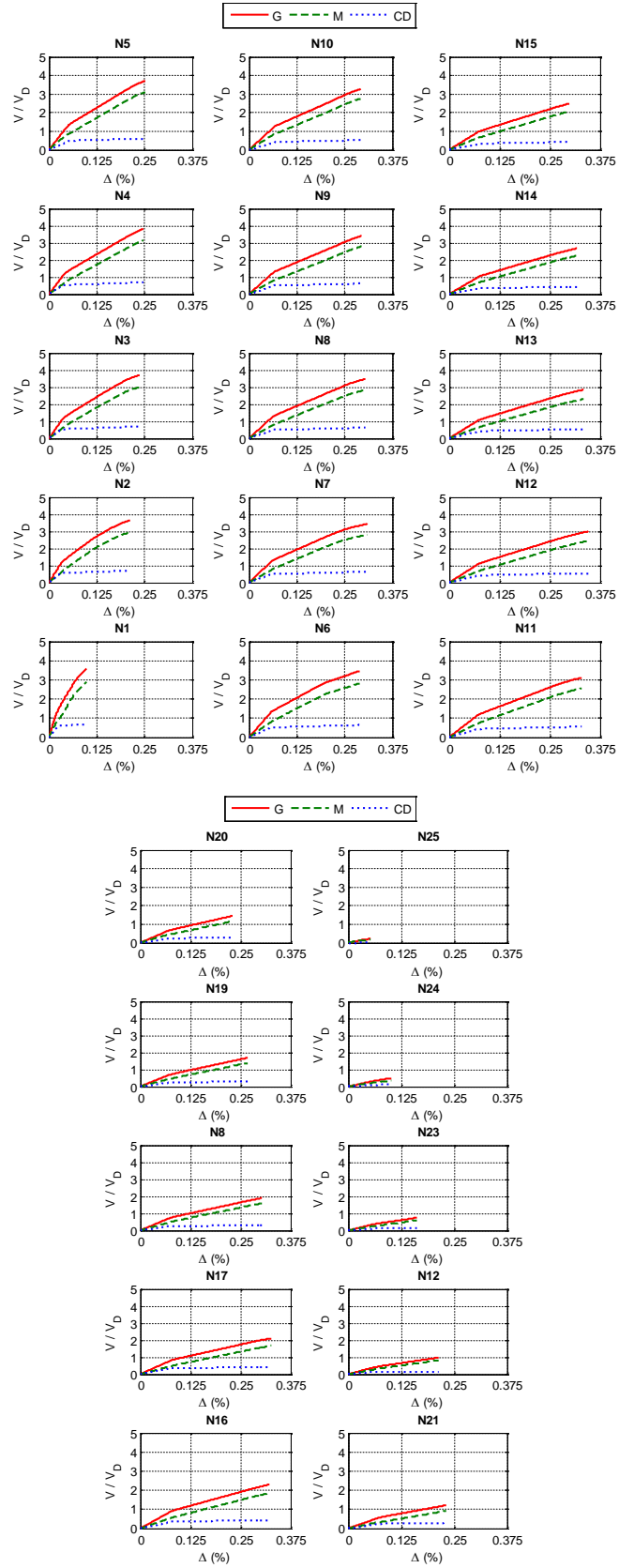


Figura A.338 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

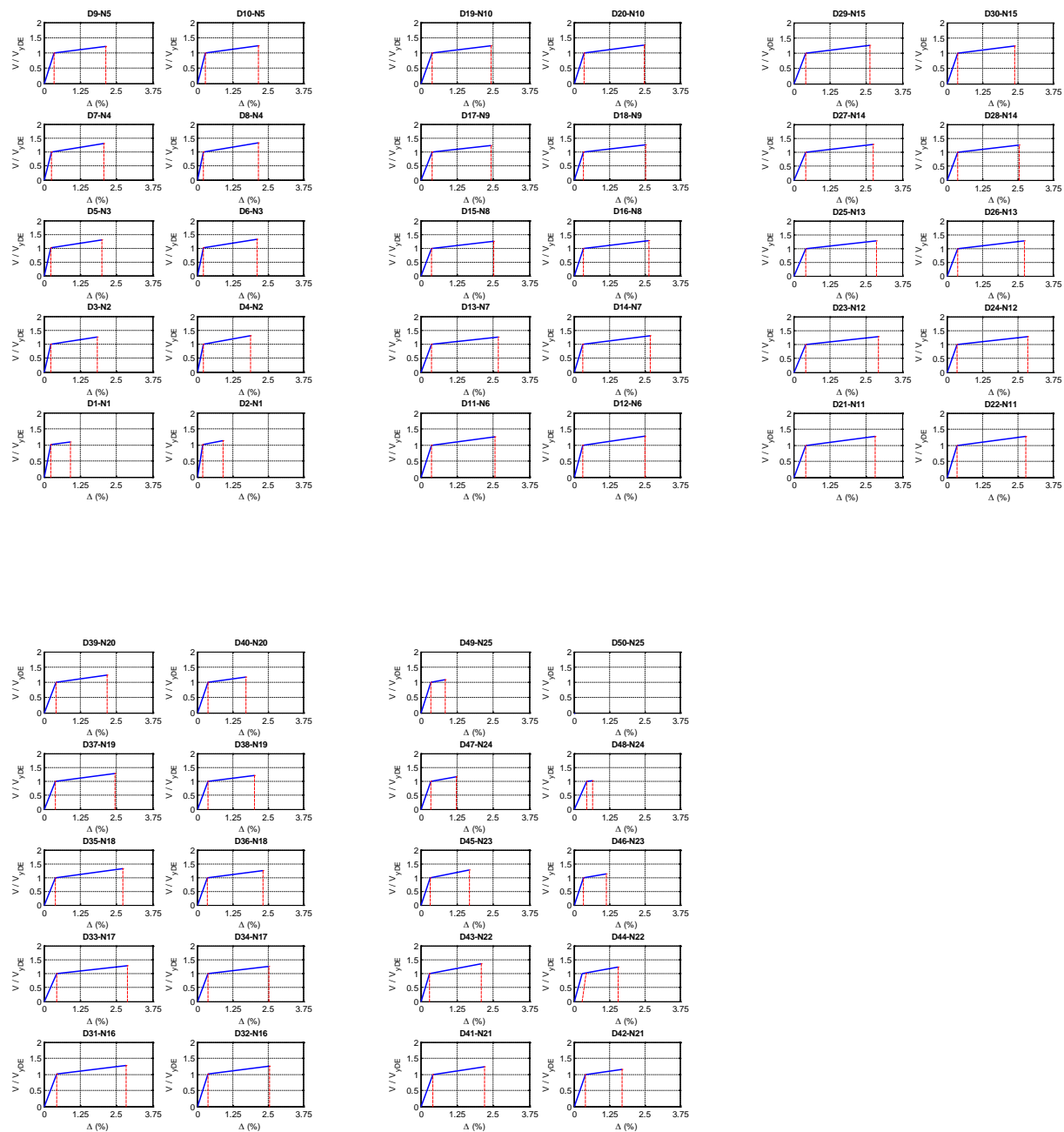


Figura A.339 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

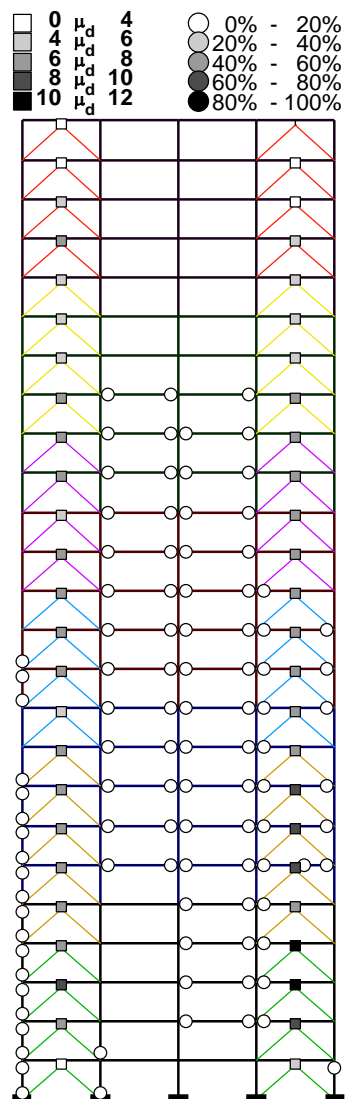
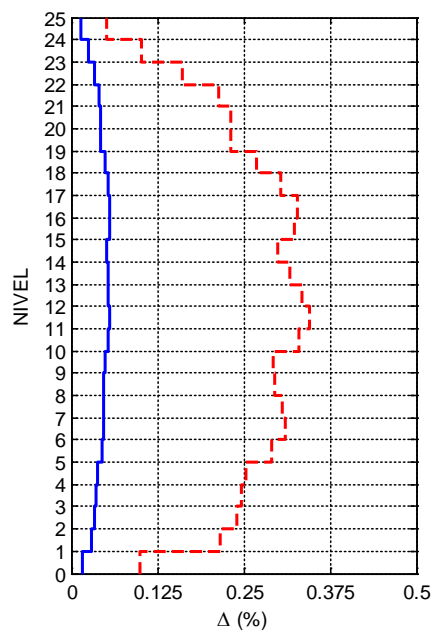
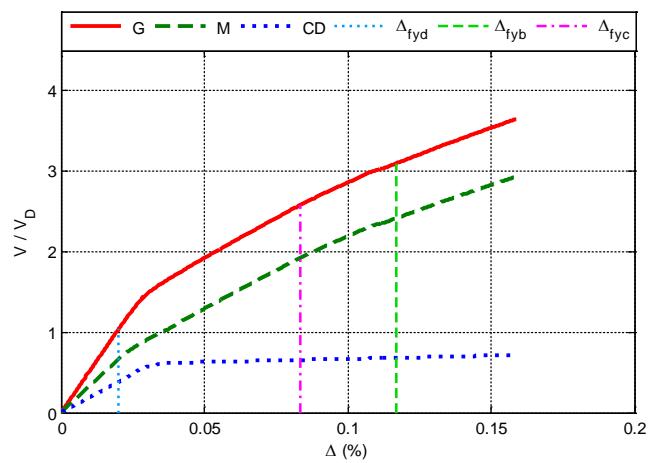


Figura A.340 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

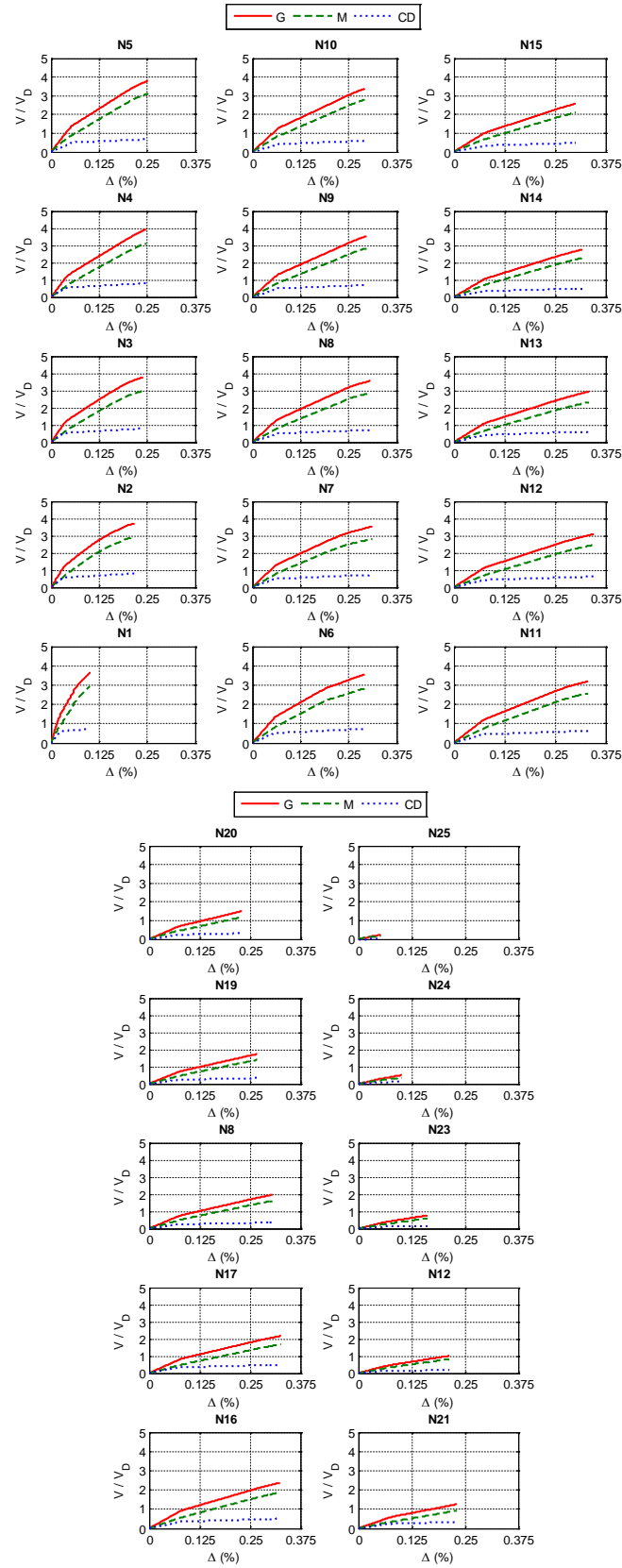


Figura A.341 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

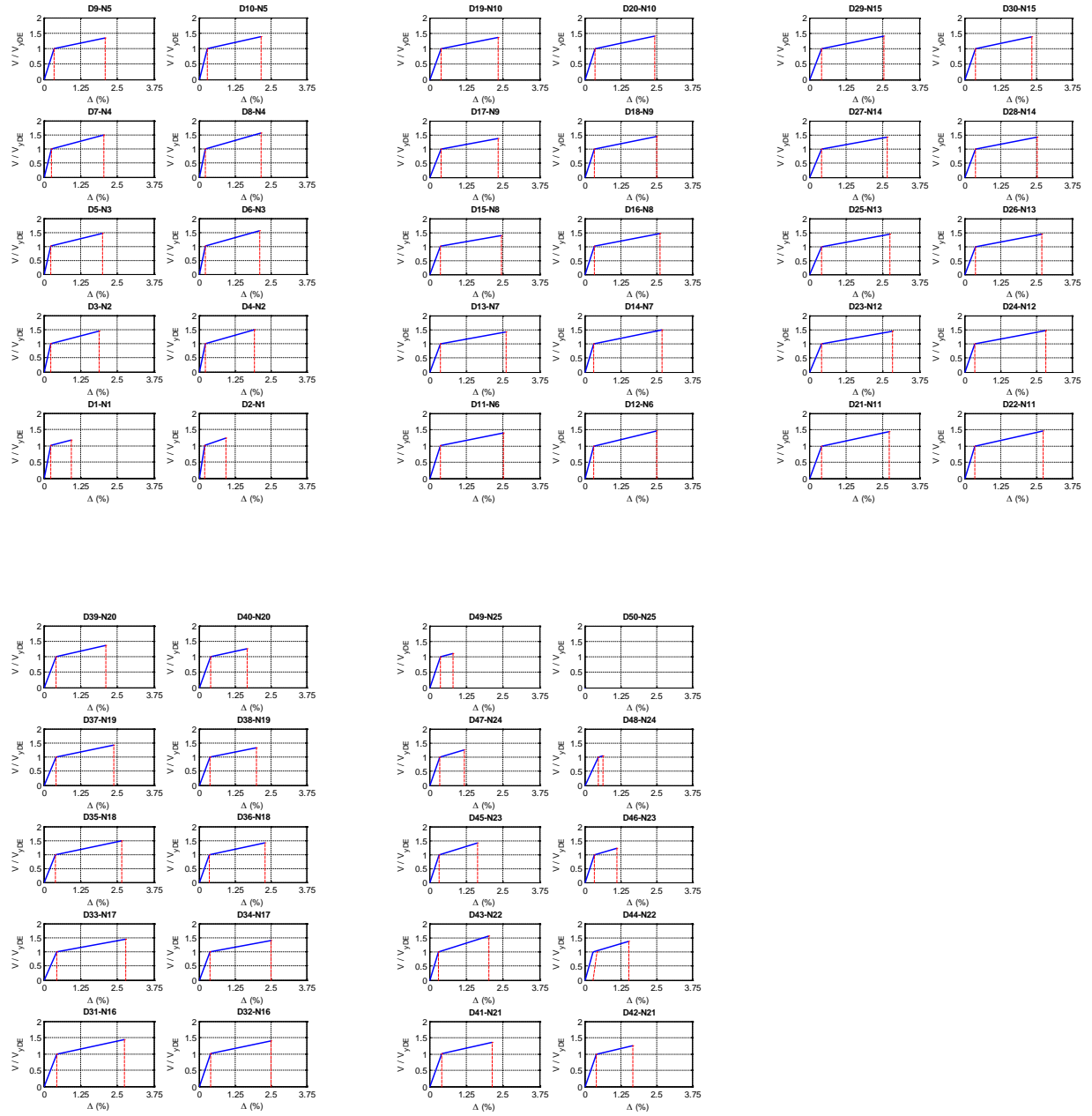


Figura A.342 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

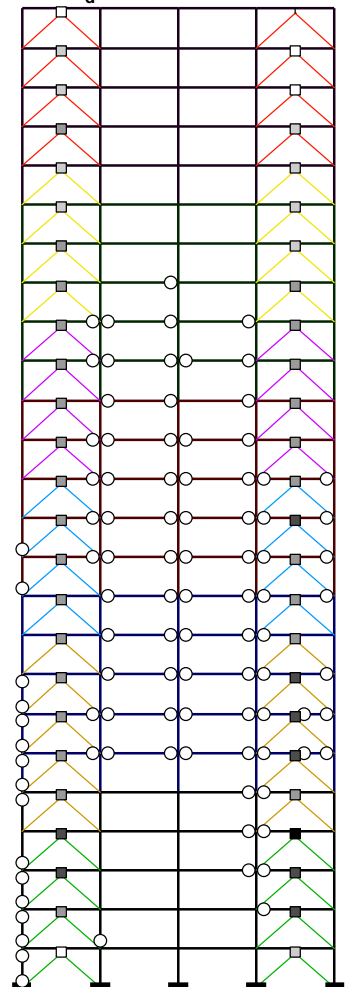
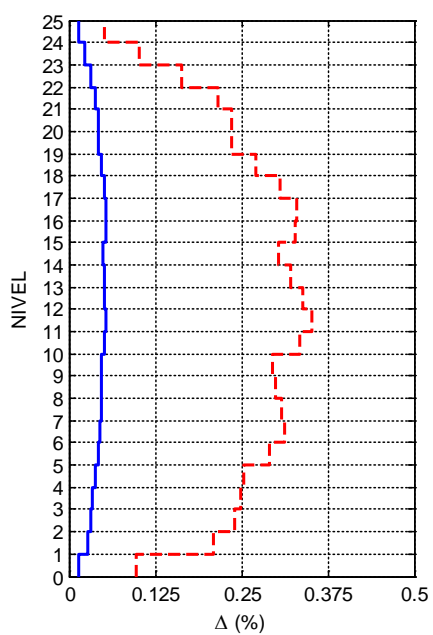
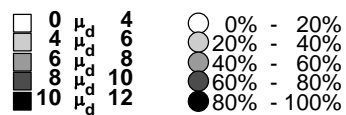
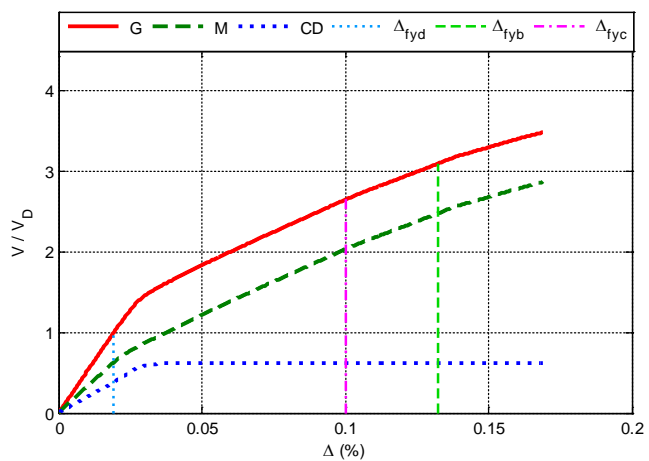


Figura A.343 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

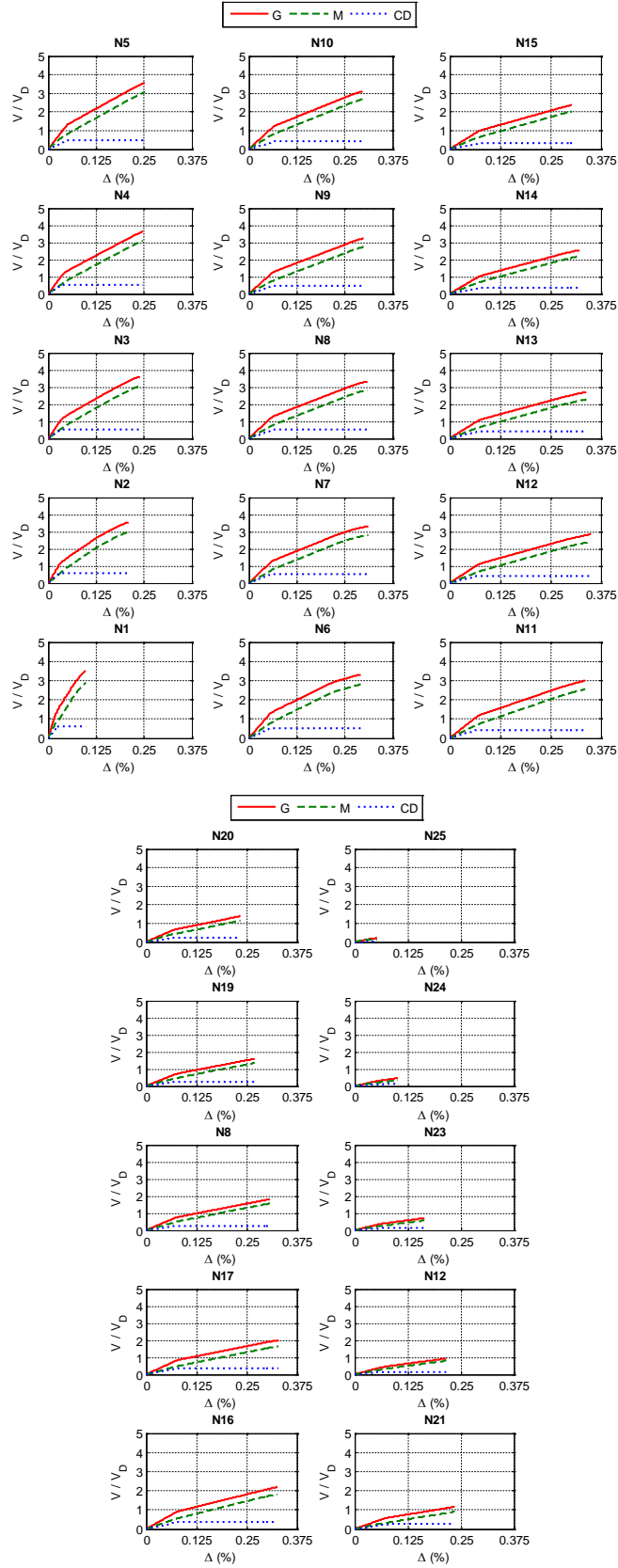


Figura A.344 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

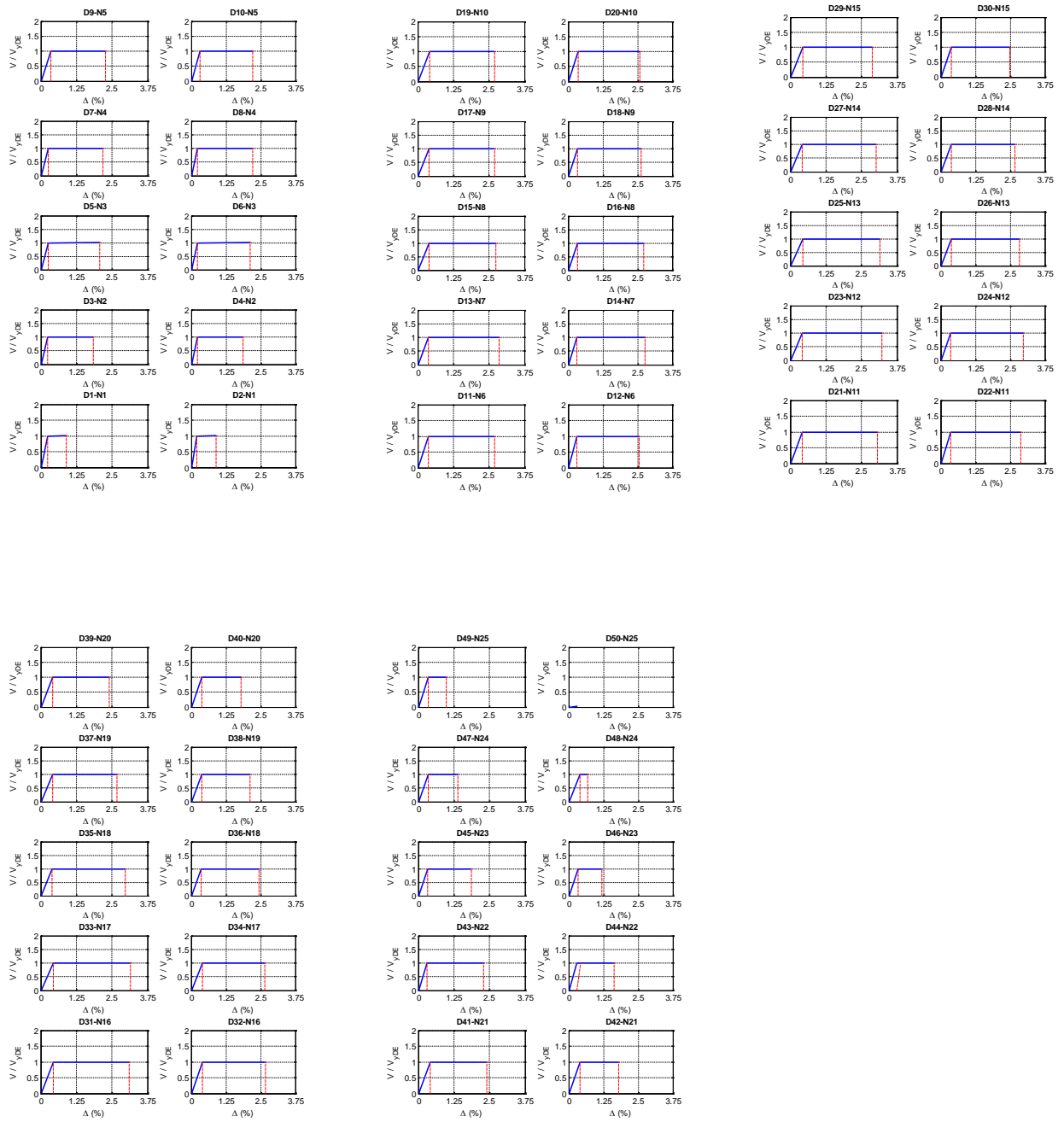


Figura A.345 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

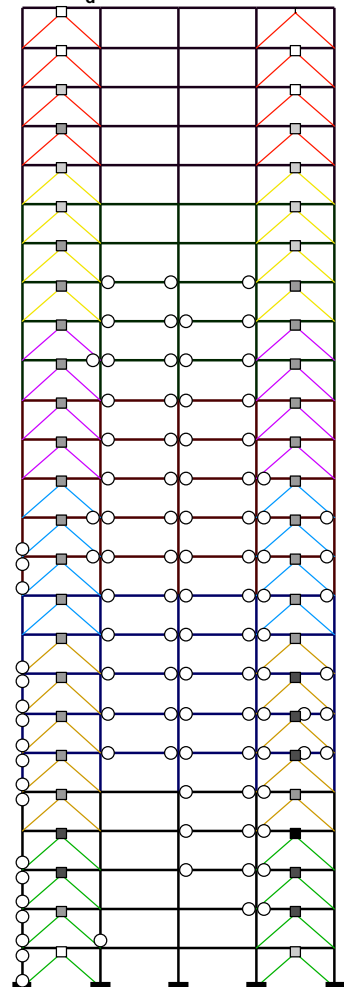
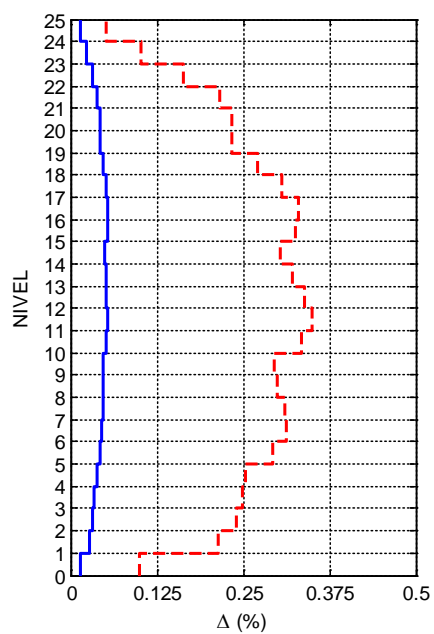
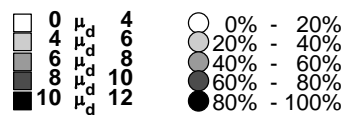
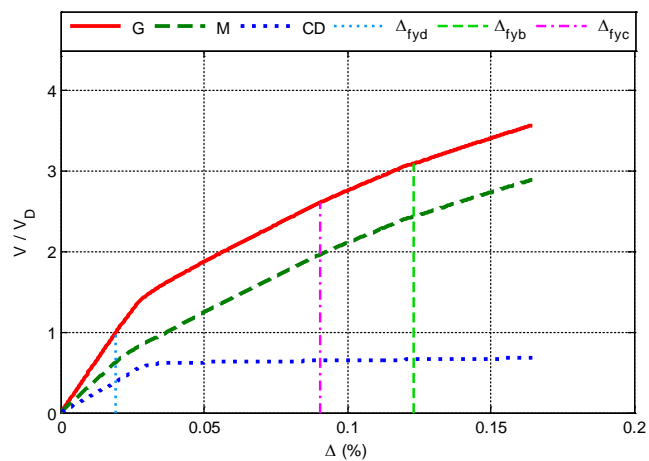


Figura A.346 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

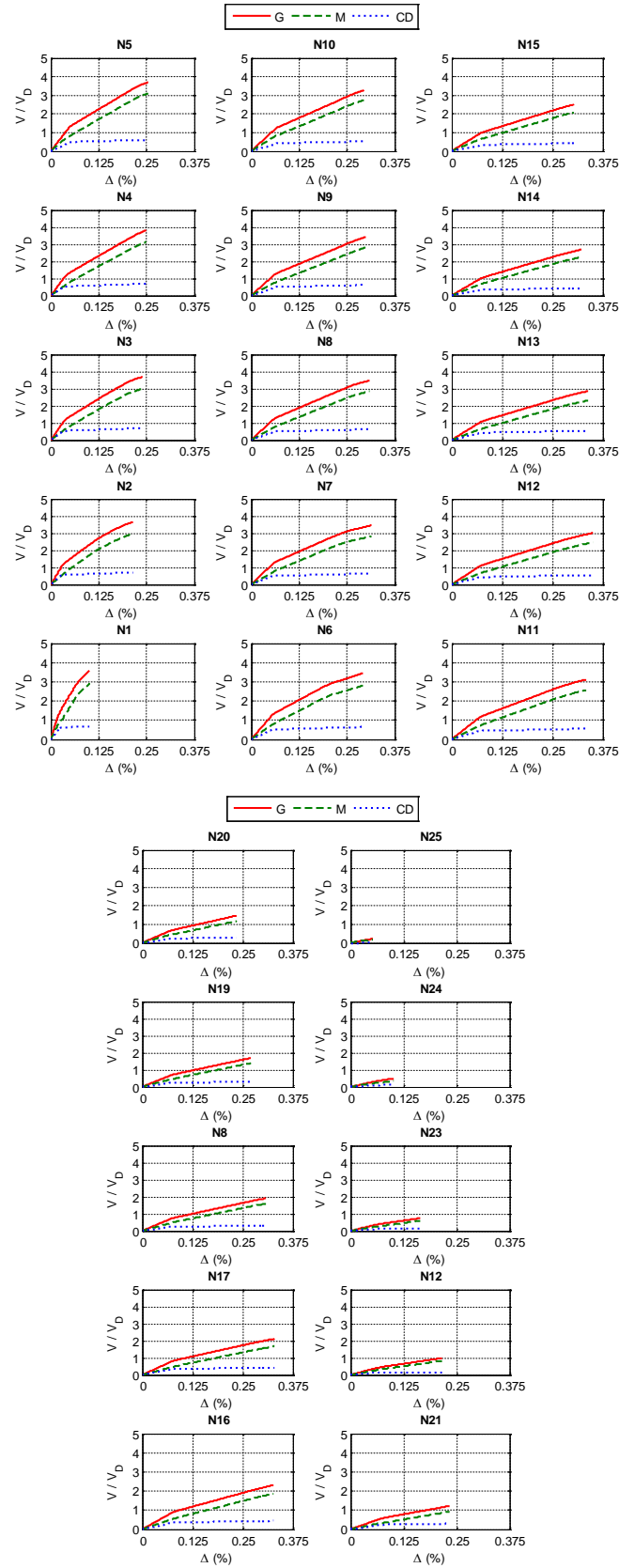


Figura A.347 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$



Figura A.348 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

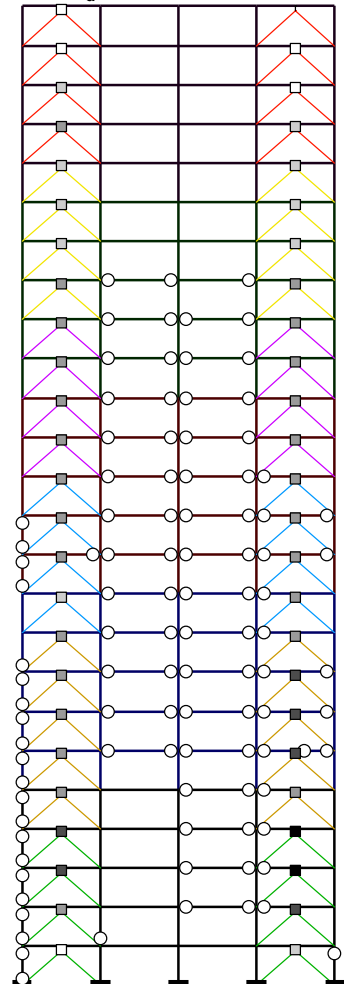
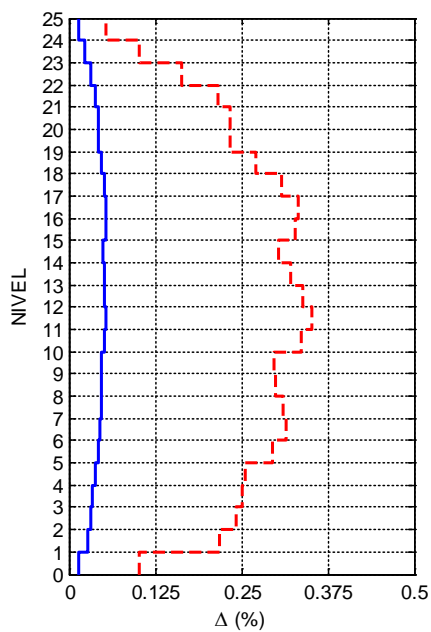
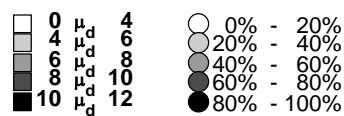
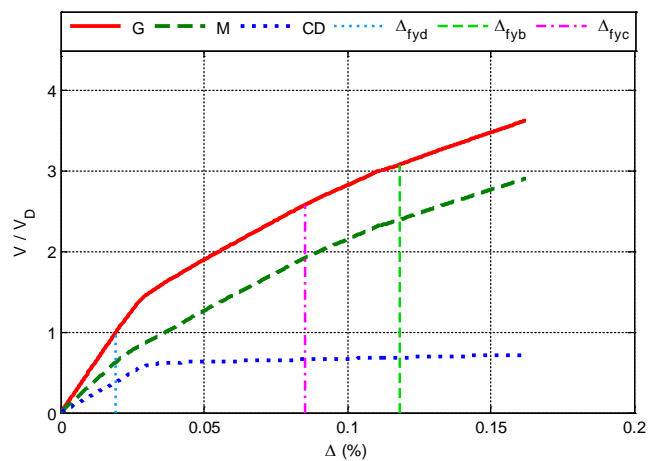


Figura A.349 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

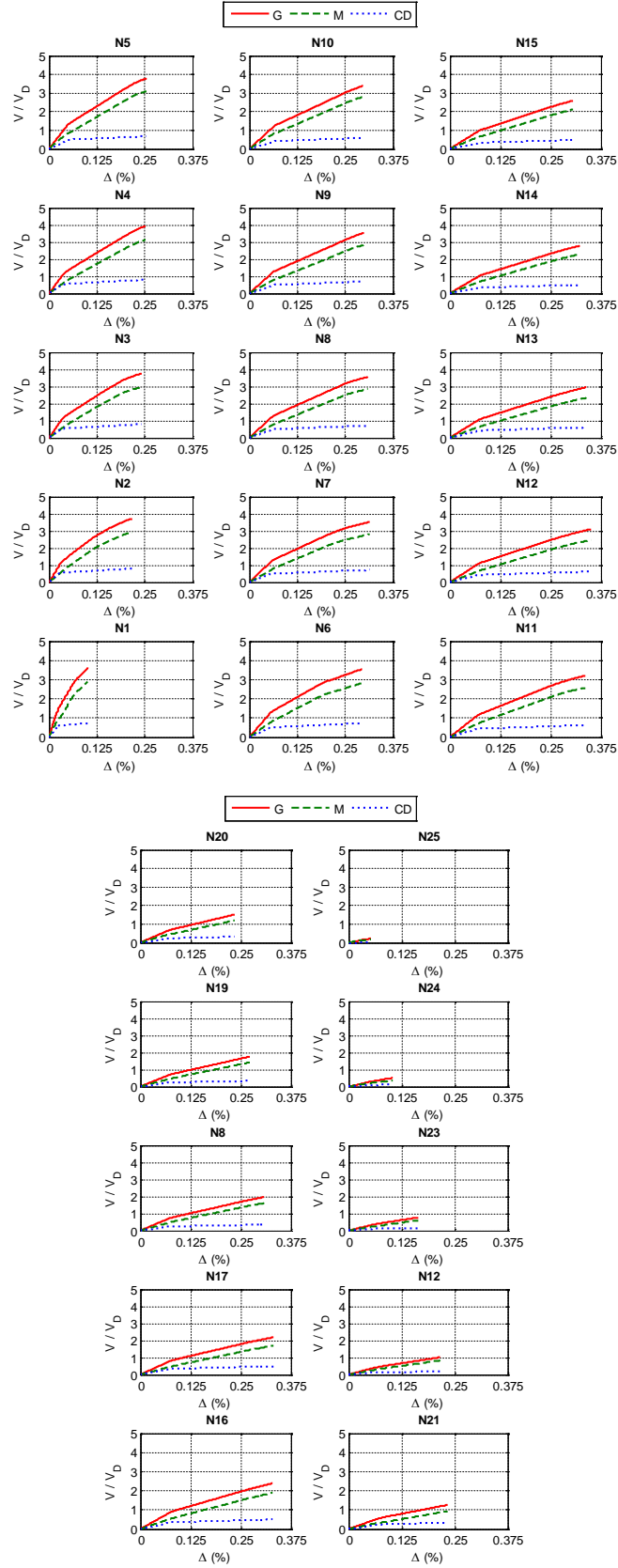


Figura A.350 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.351 $N = 25, \alpha = 0.5, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

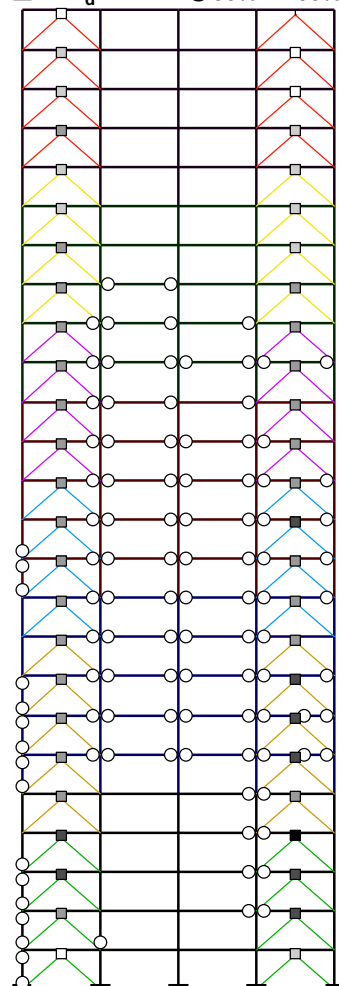
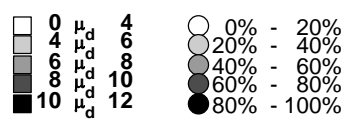
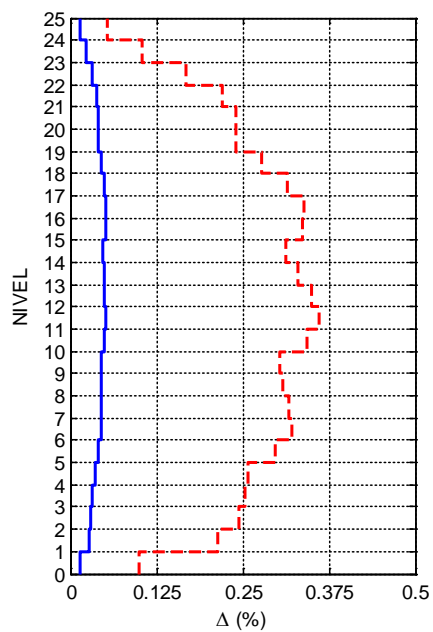
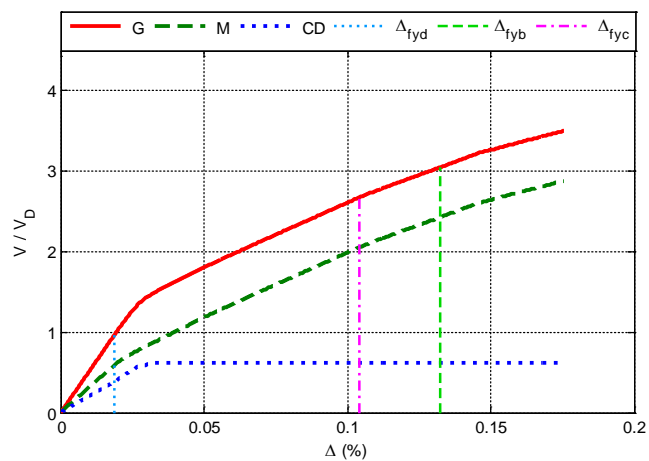


Figura A.352 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

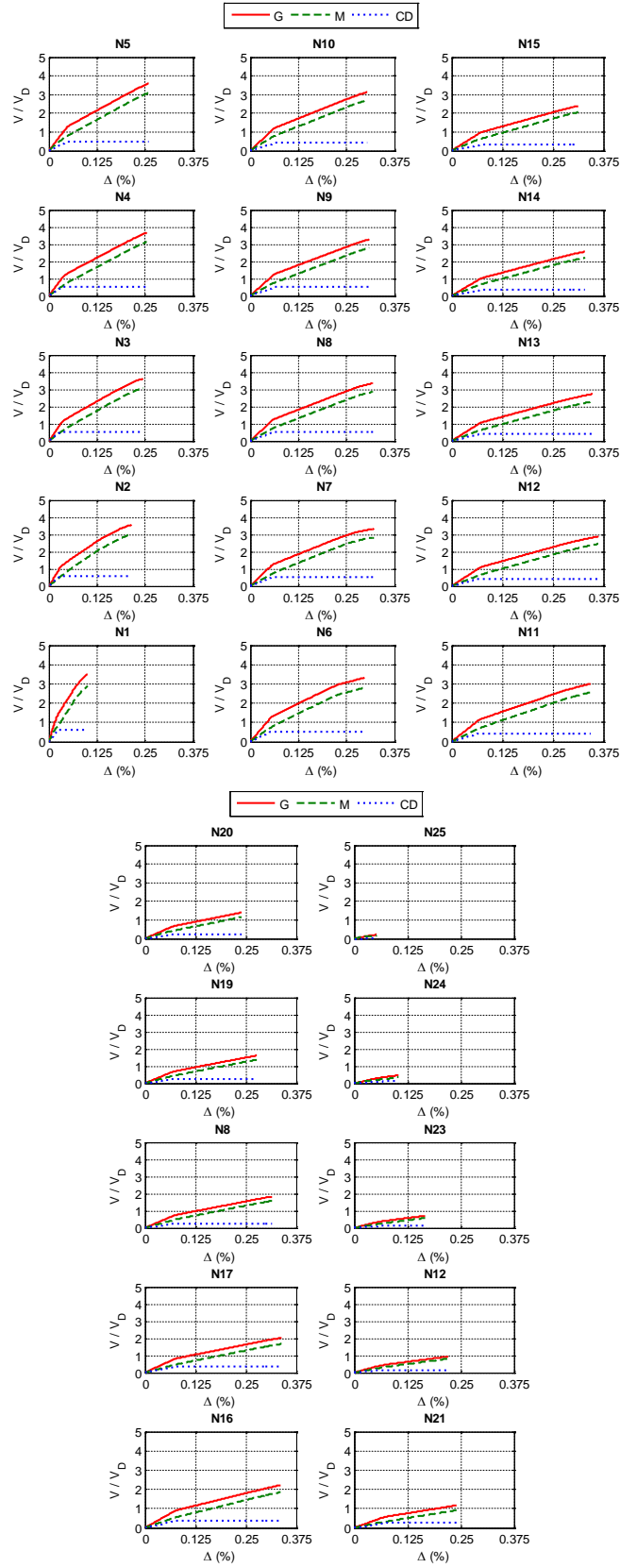


Figura A.353 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

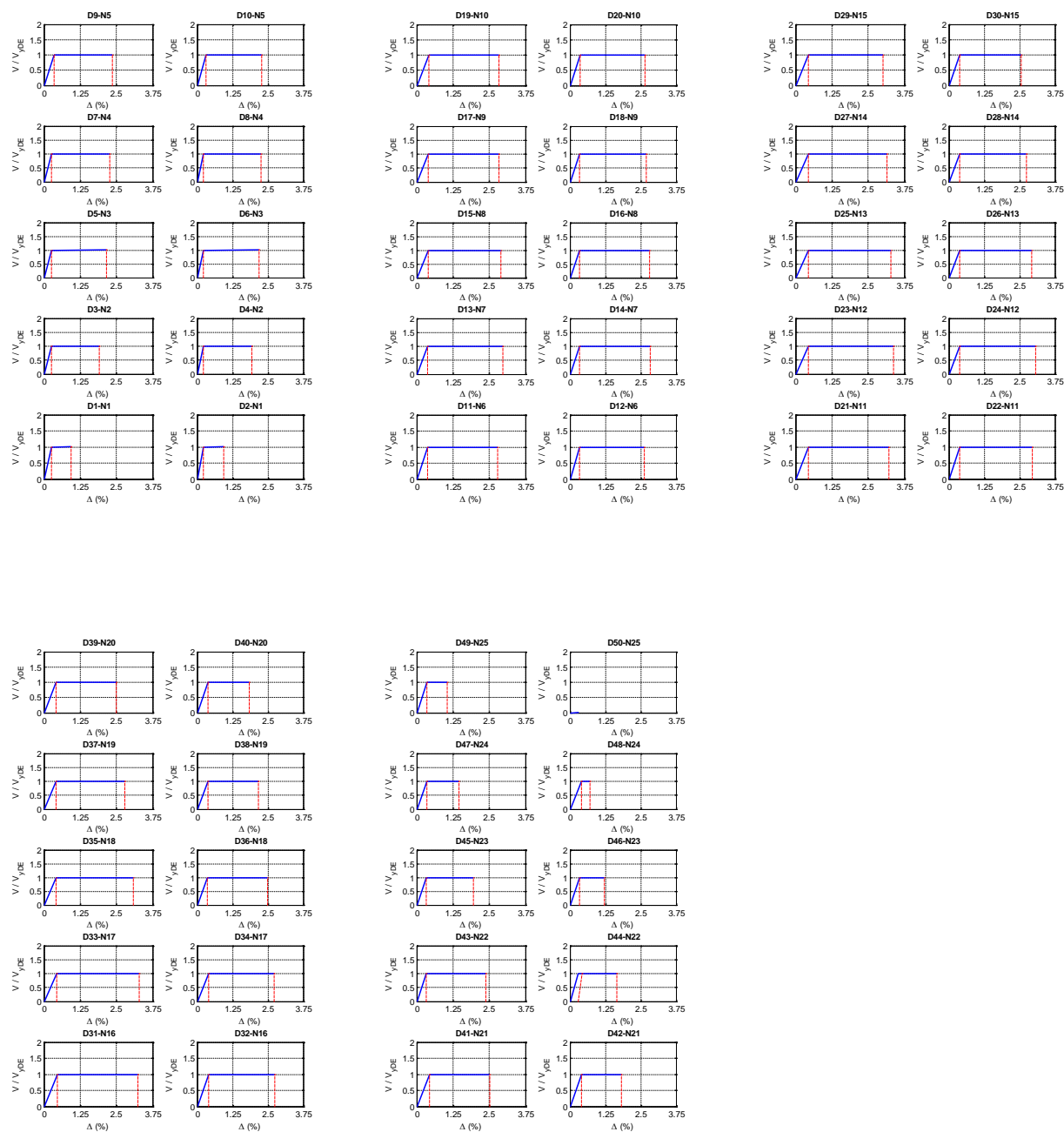


Figura A.354 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

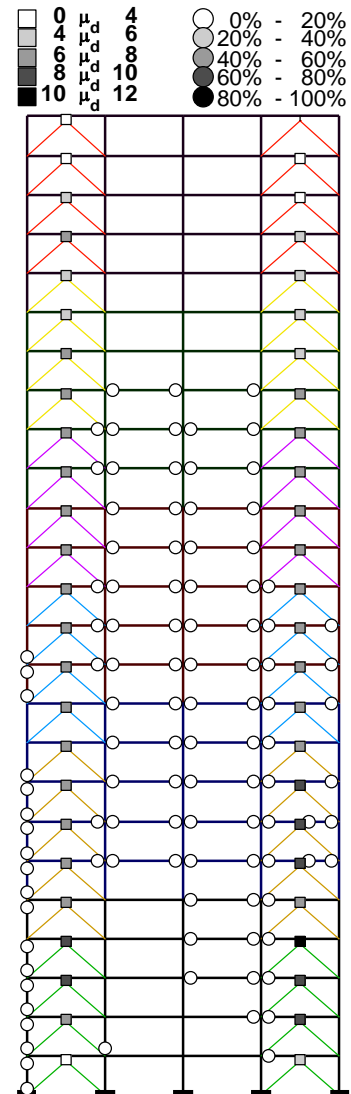
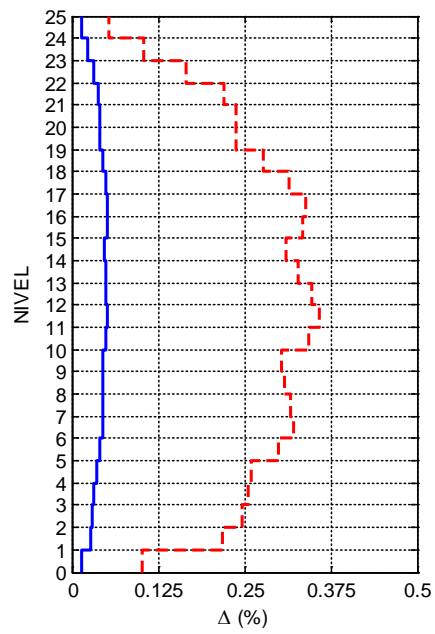
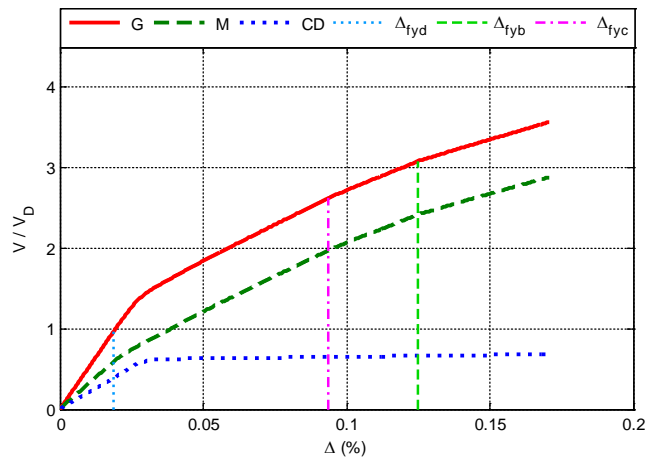


Figura A.355 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

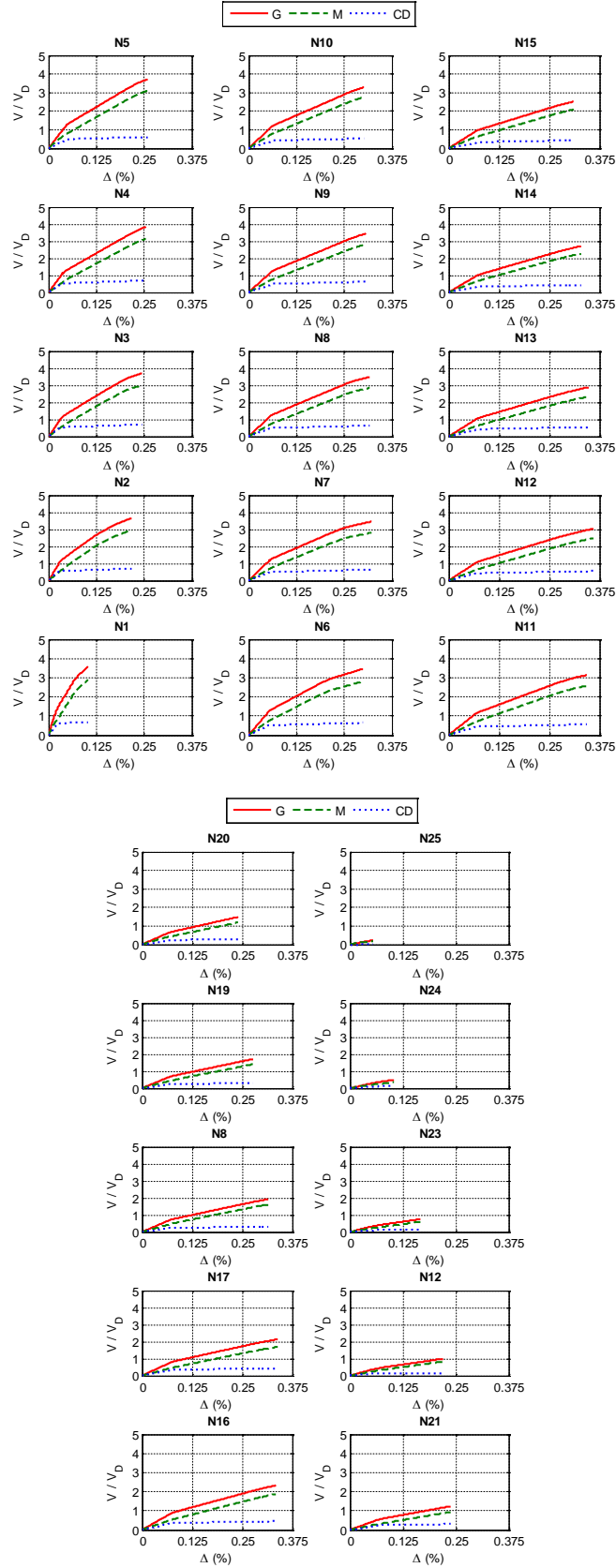


Figura A.356 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

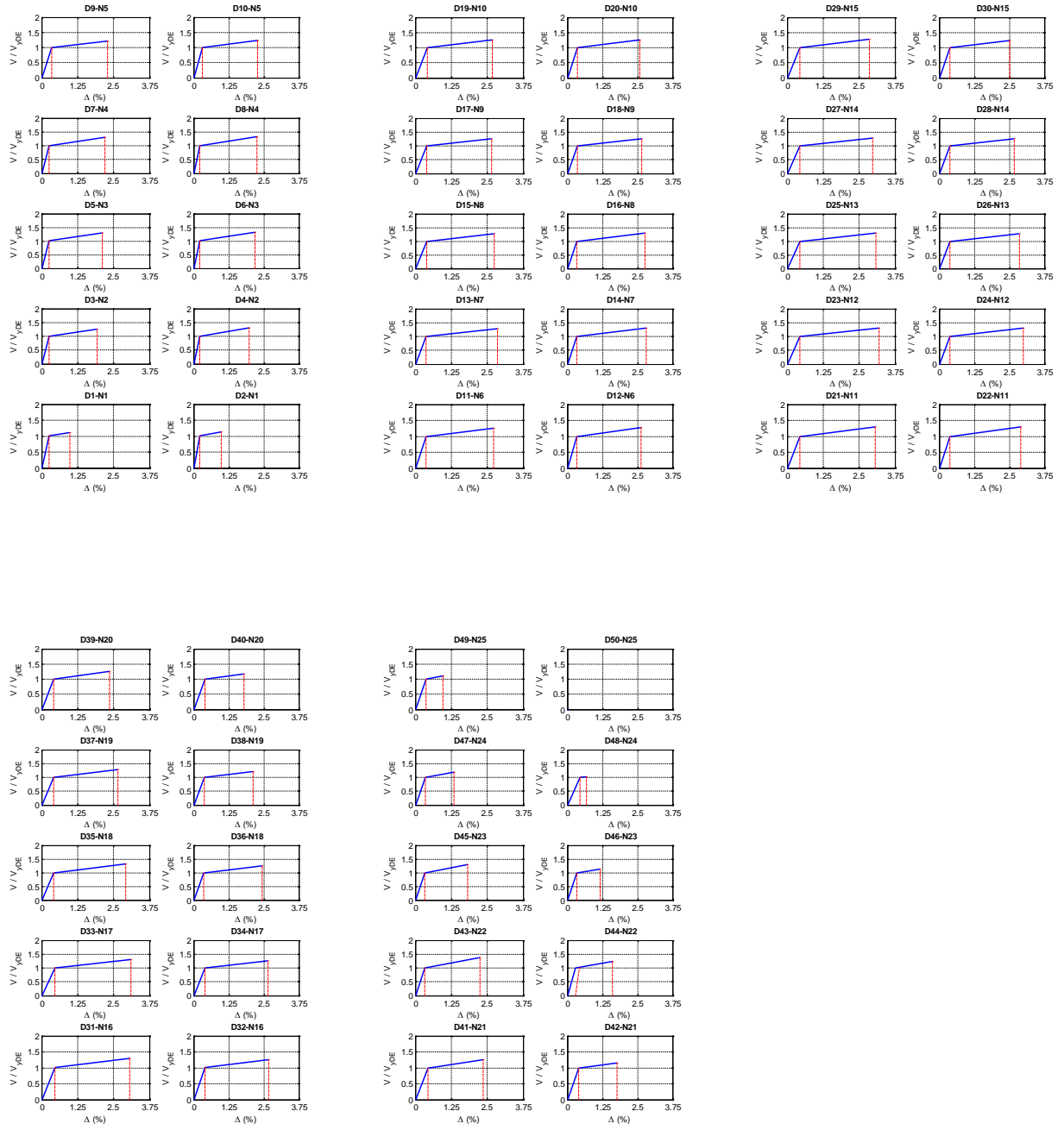


Figura A.357 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

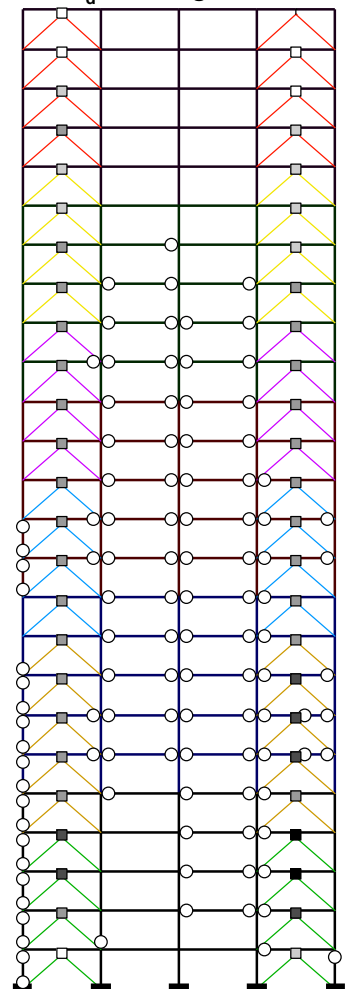
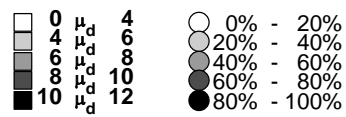
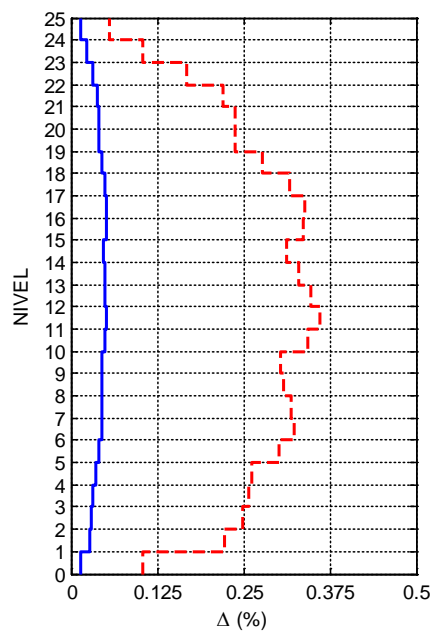
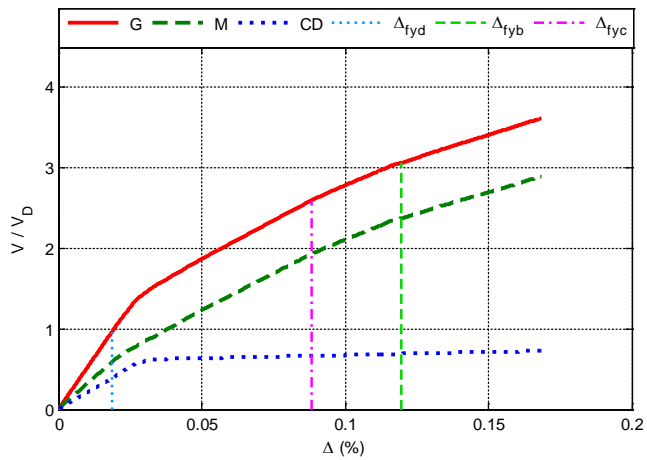


Figura A.358 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

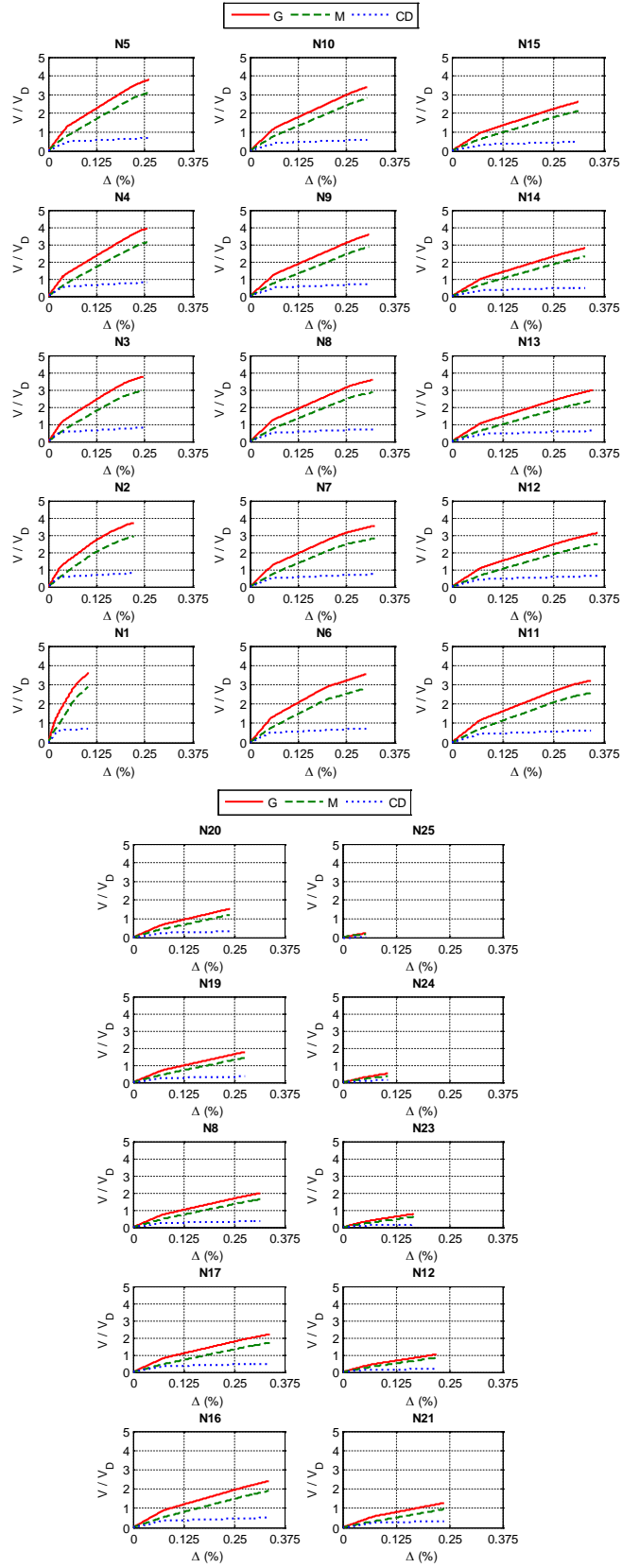


Figura A.359 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

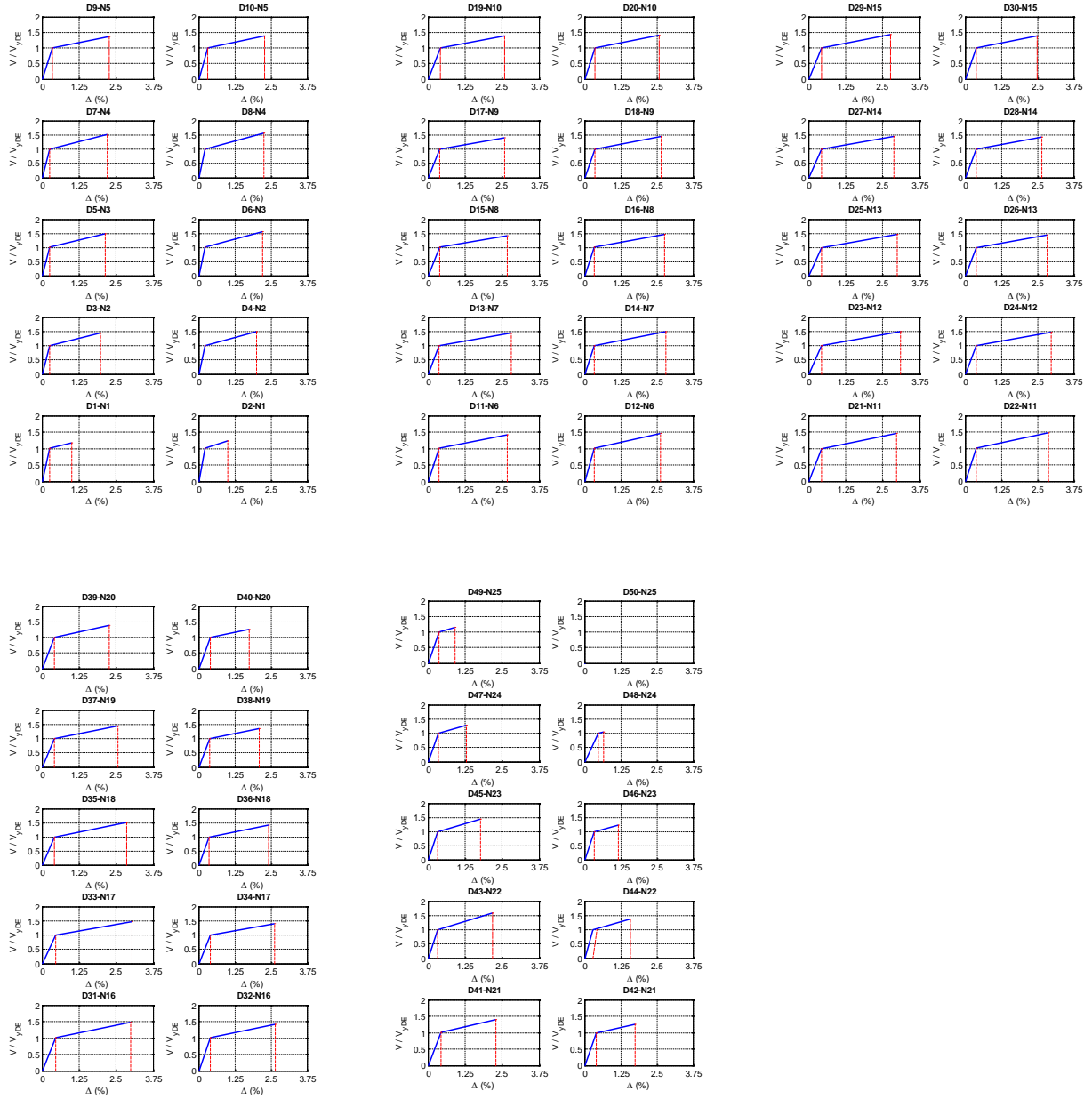


Figura A.360 $N = 25$, $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

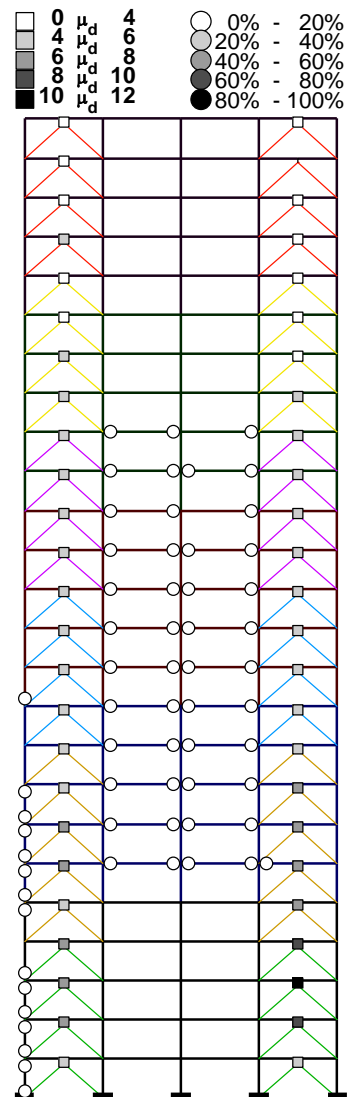
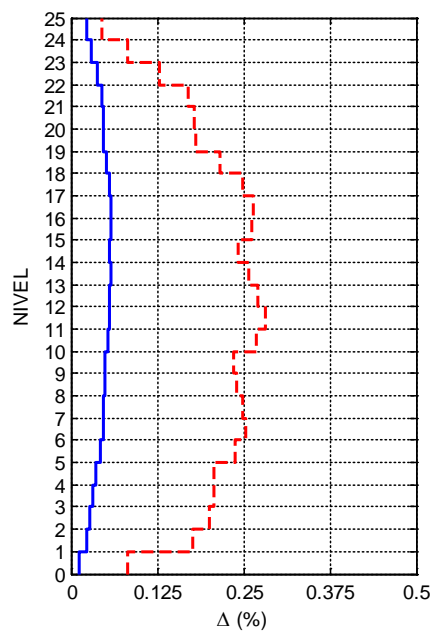
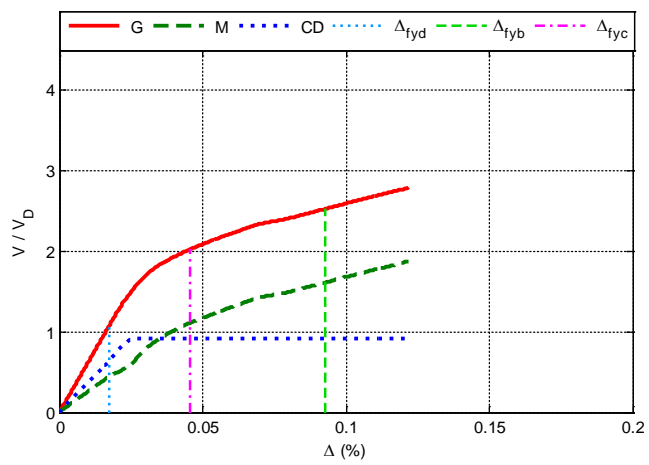


Figura A.361 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

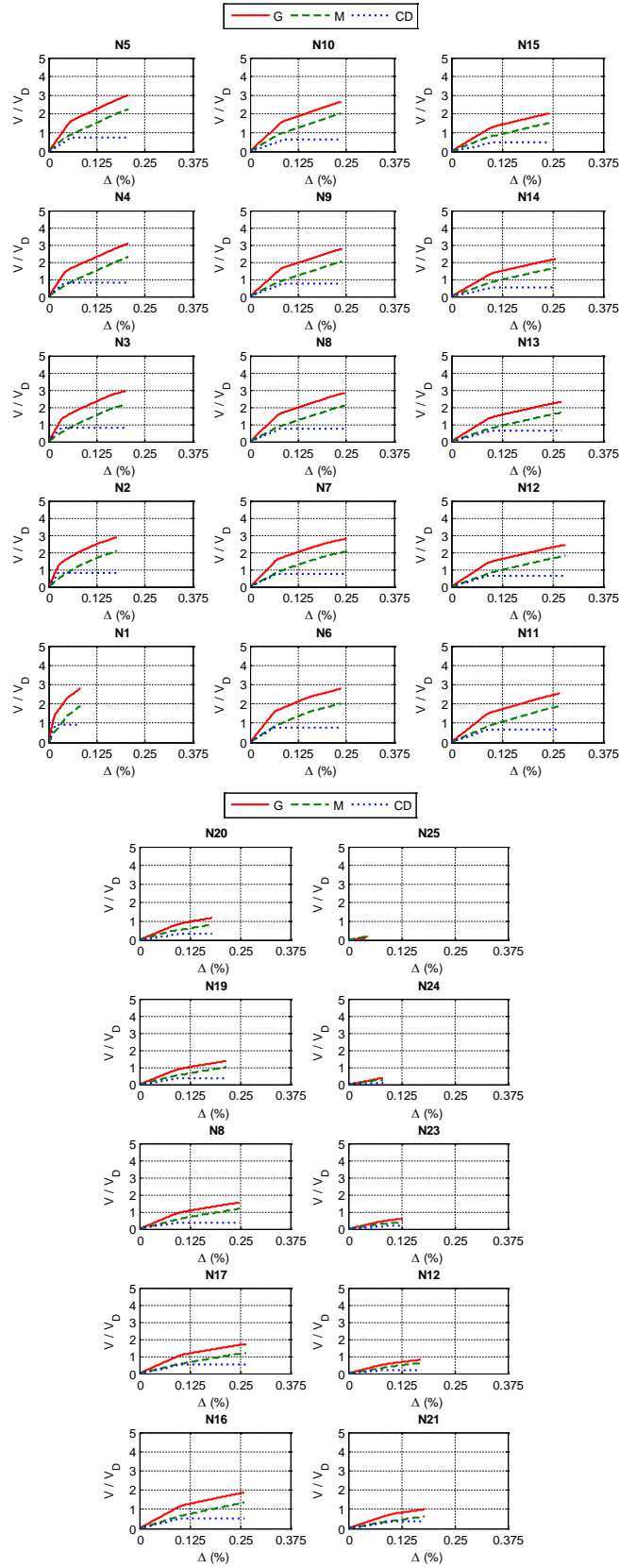


Figura A.362 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

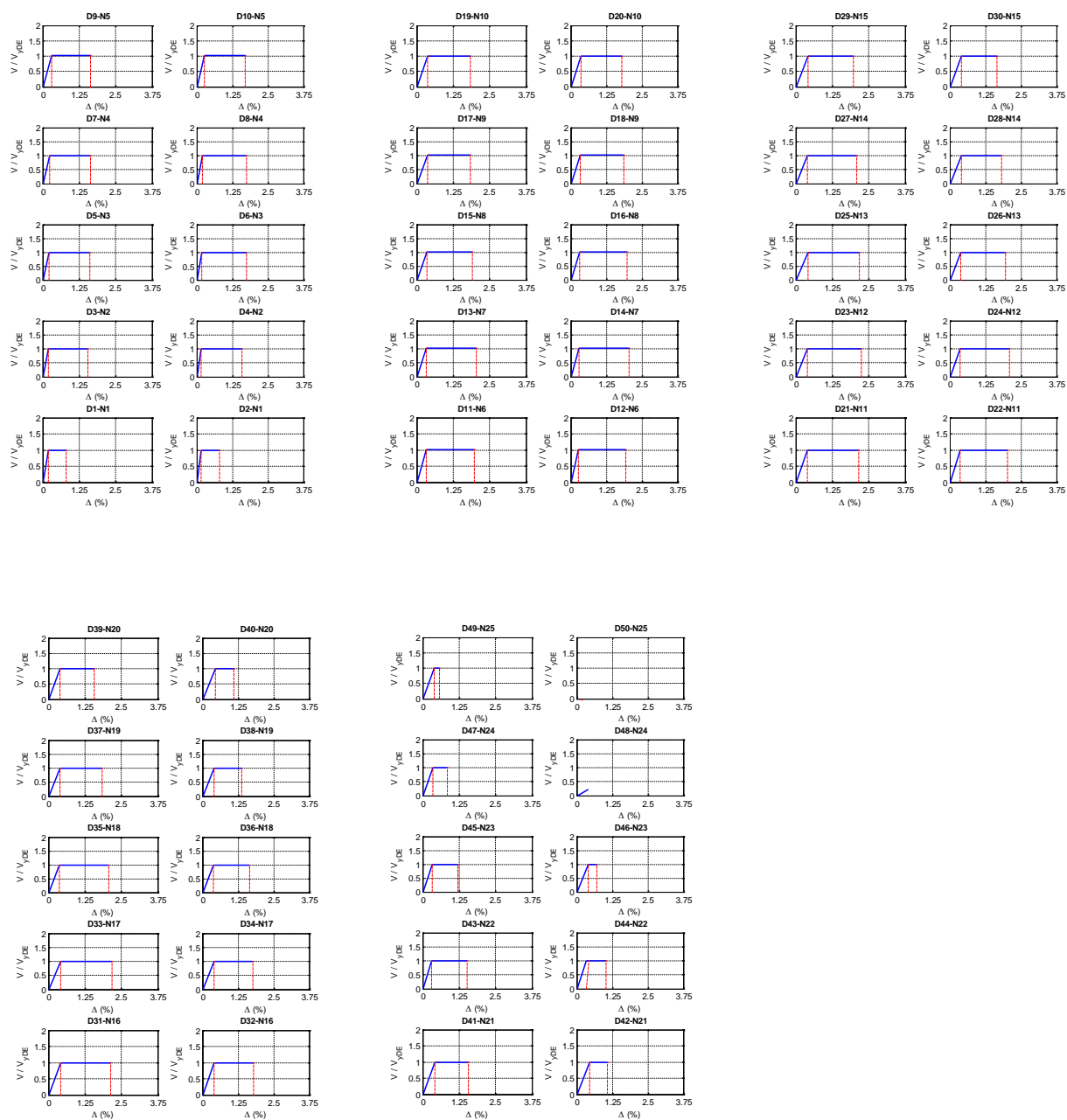


Figura A.363 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 0\%$

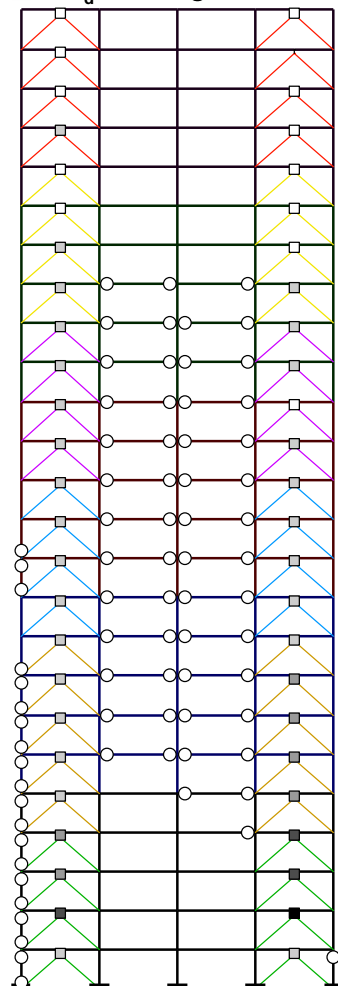
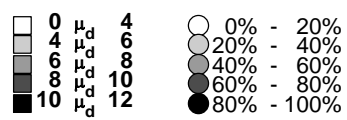
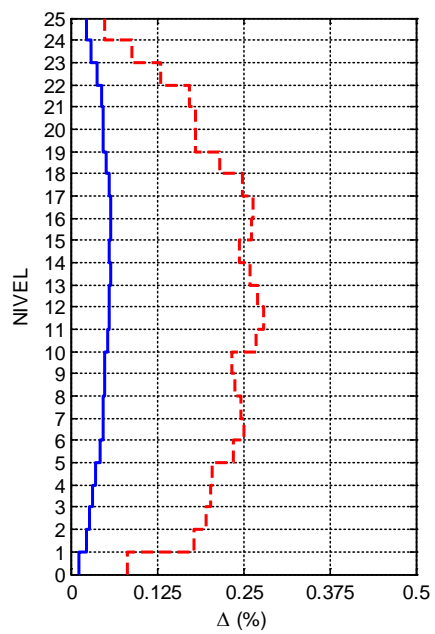
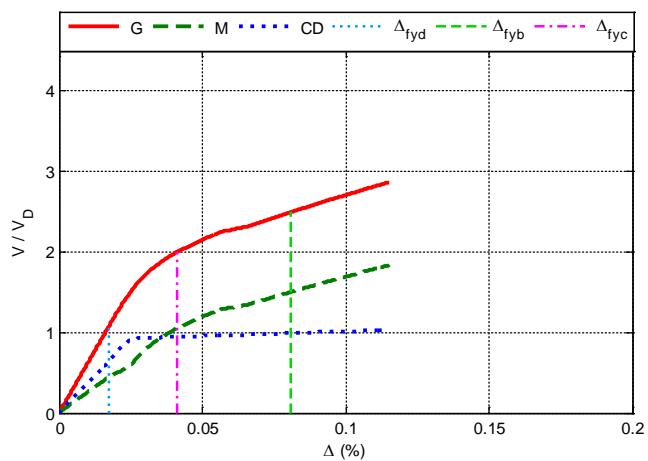


Figura A.364 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

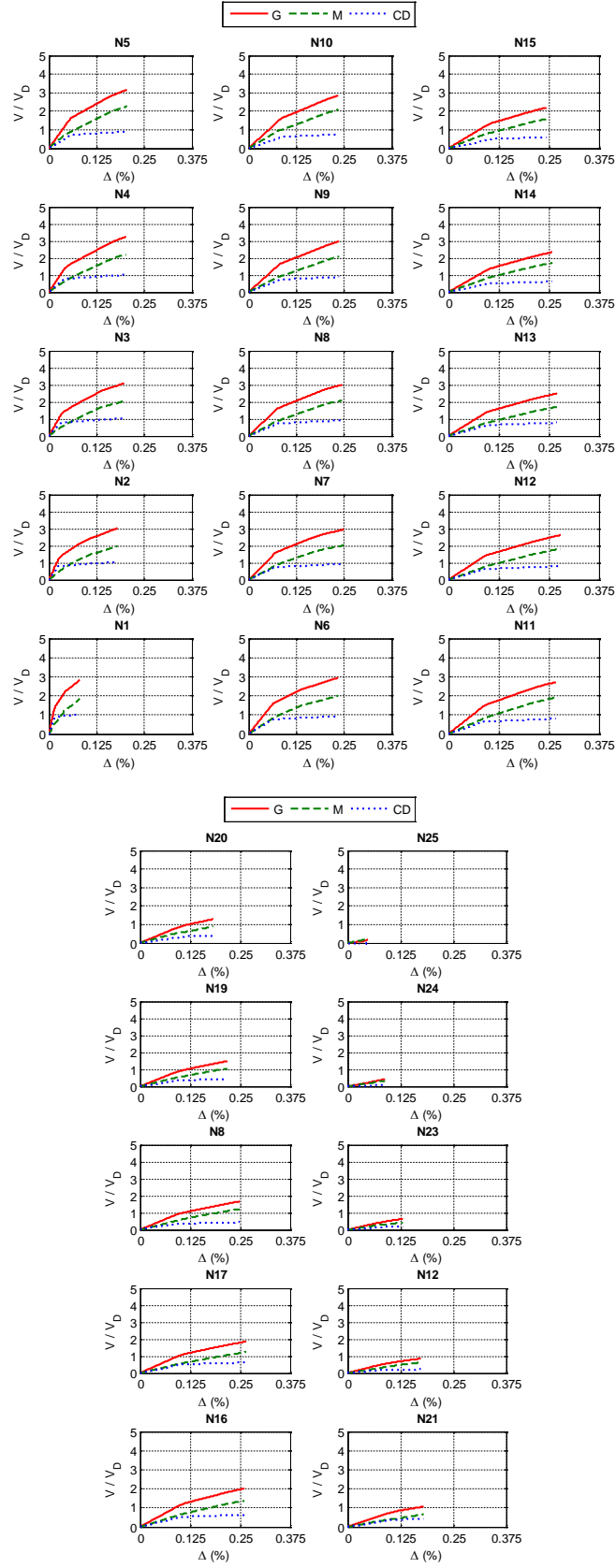


Figura A.365 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

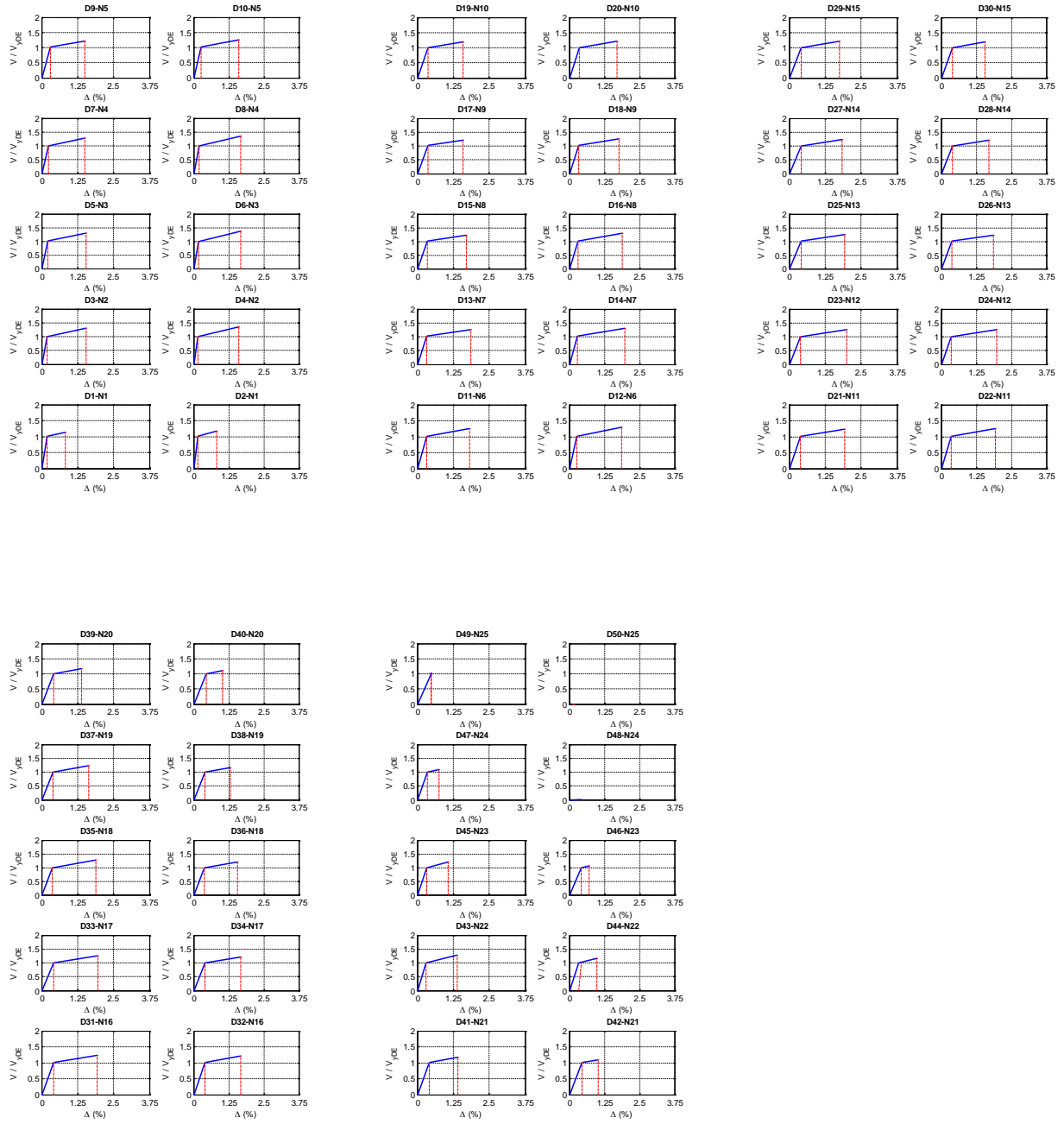


Figura A.366 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 3\%$

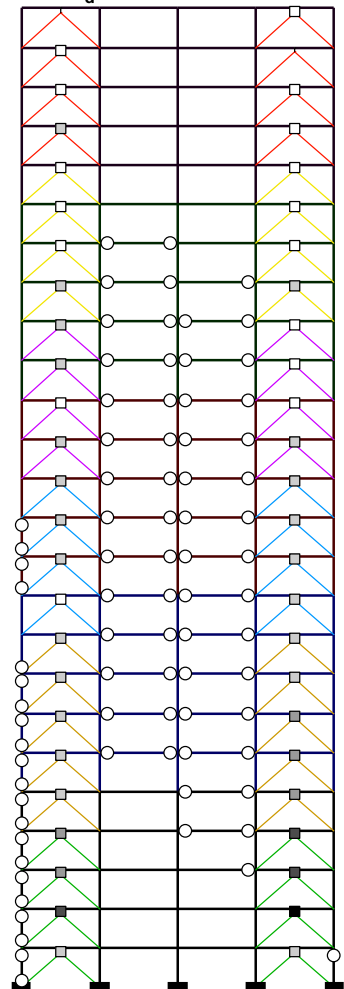
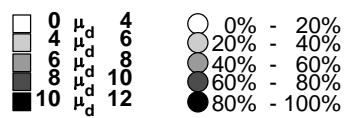
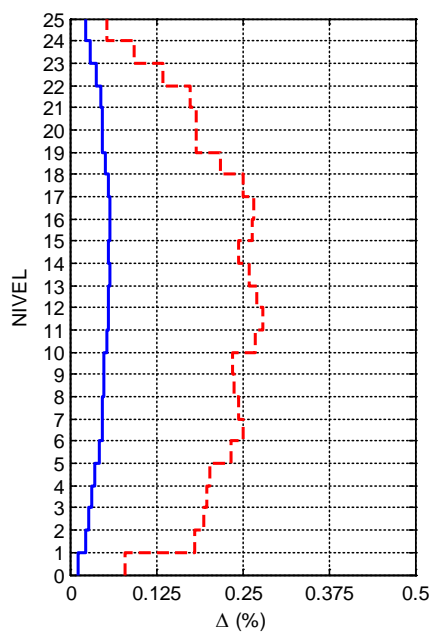
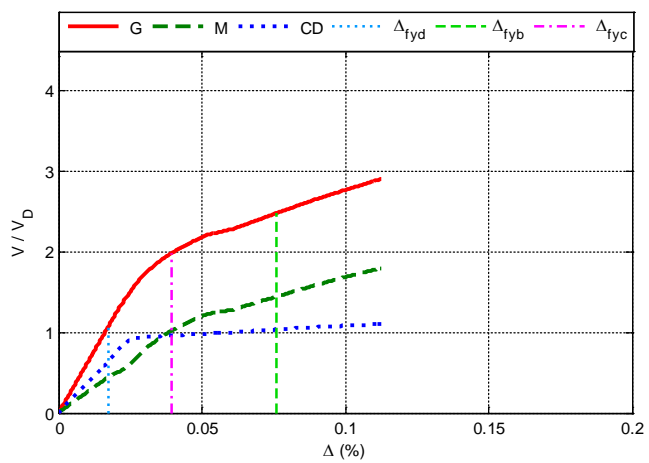


Figura A.367 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

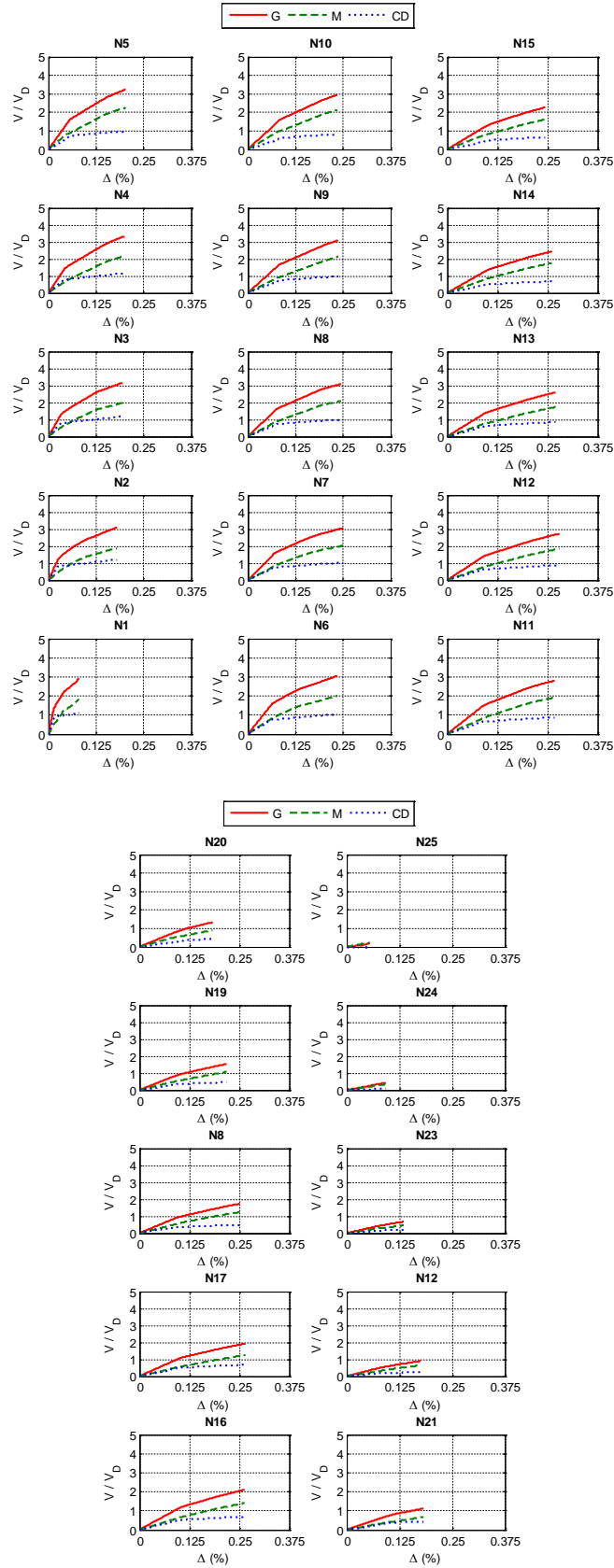


Figura A.368 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

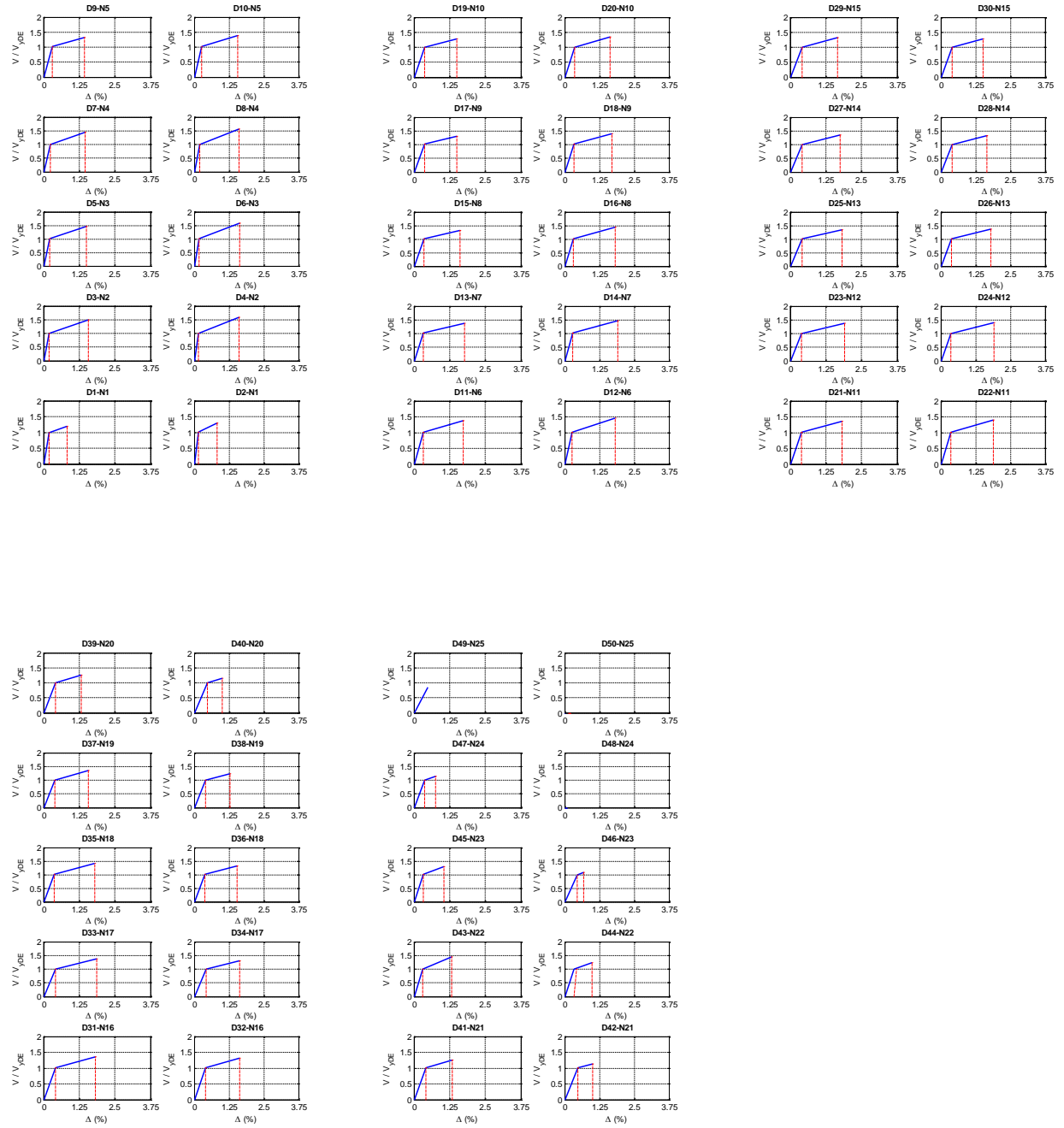


Figura A.369 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 1.0$ y $K_2 = 5\%$

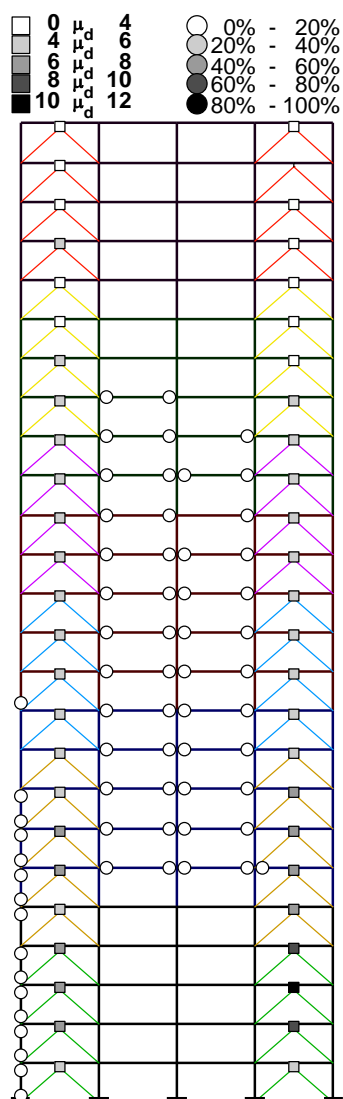
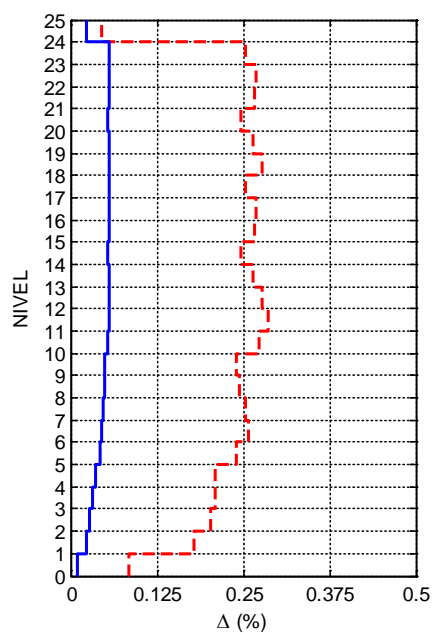
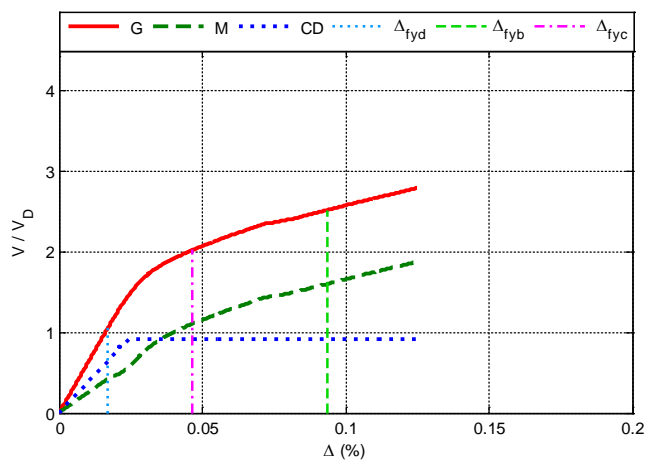


Figura A.370 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

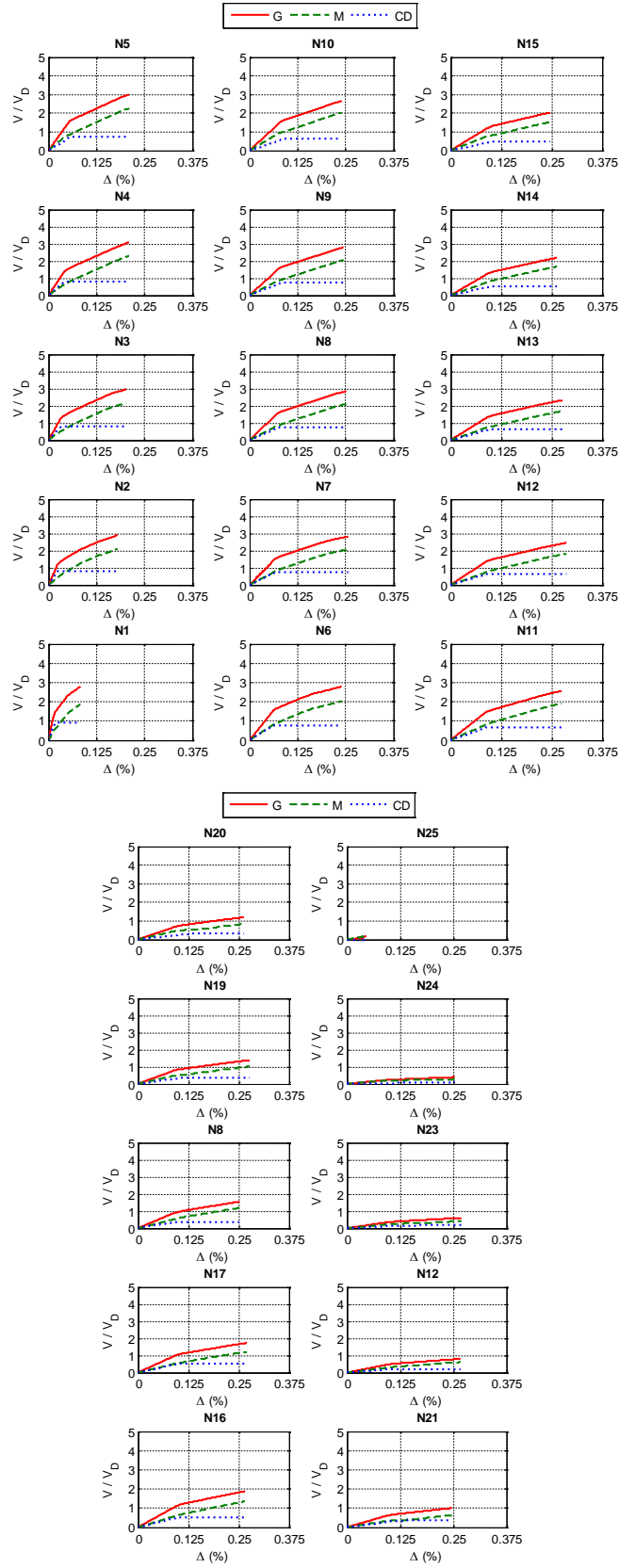


Figura A.371 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

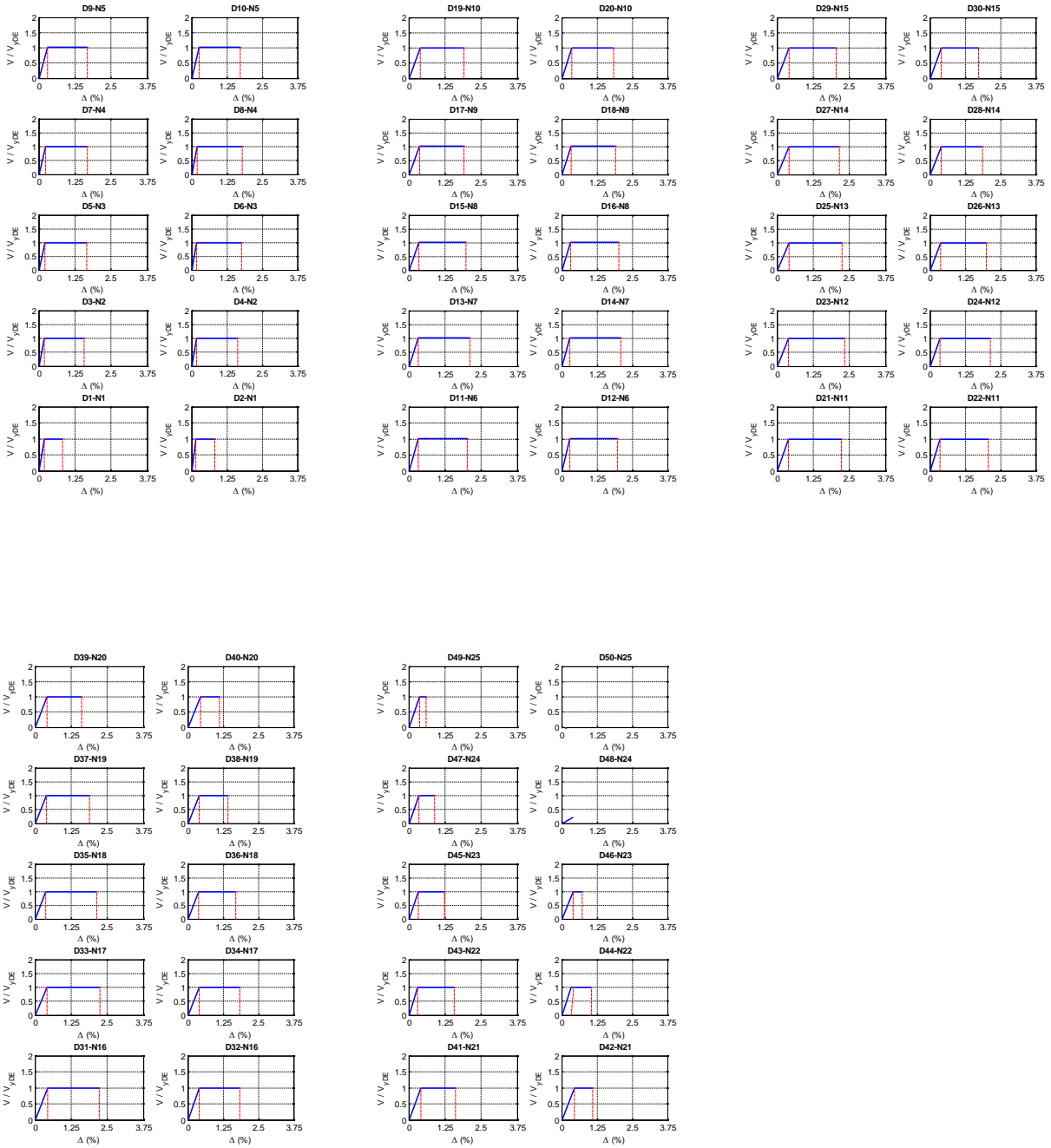


Figura A.372 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 0\%$

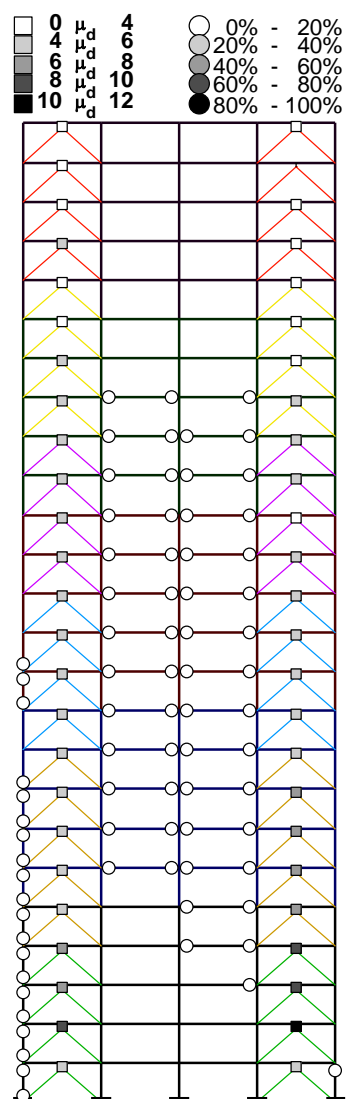
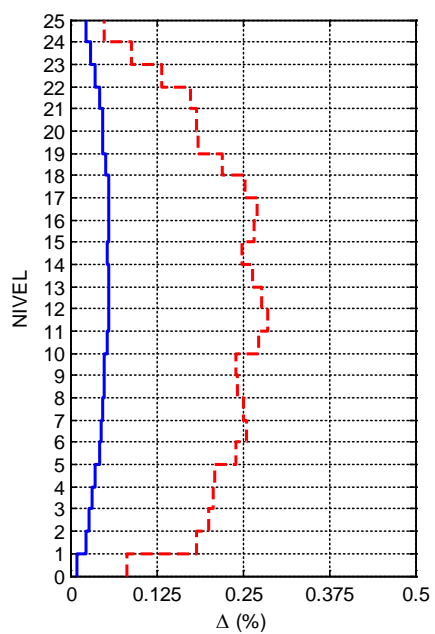
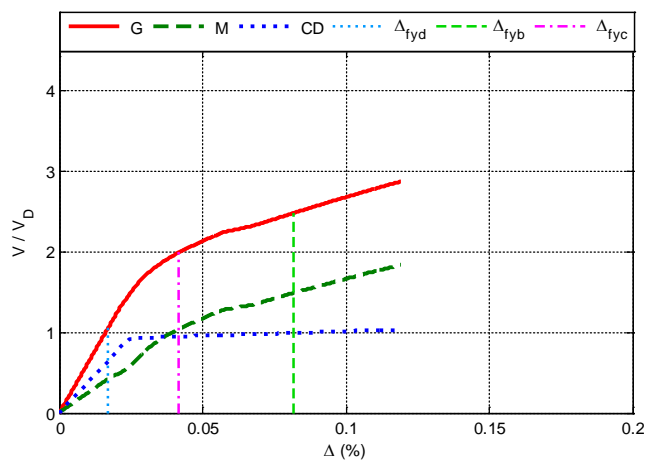


Figura A.373 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

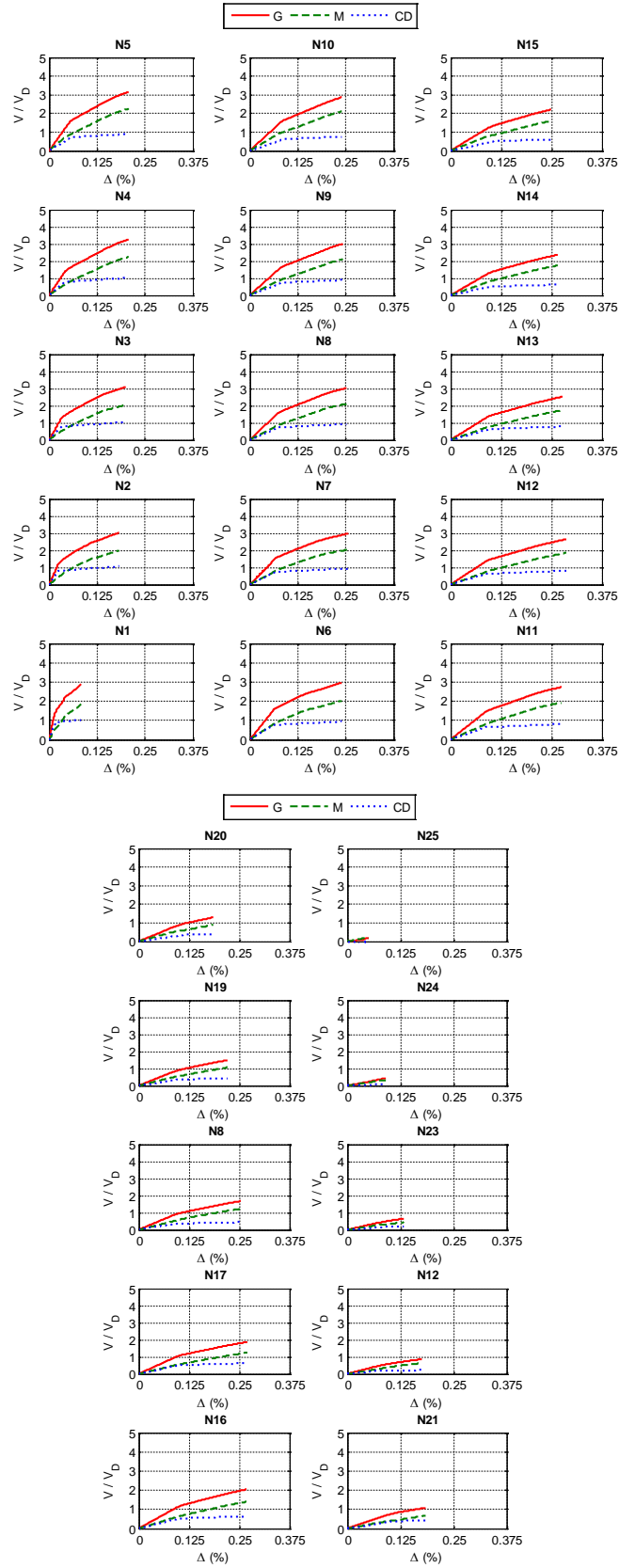


Figura A.374 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

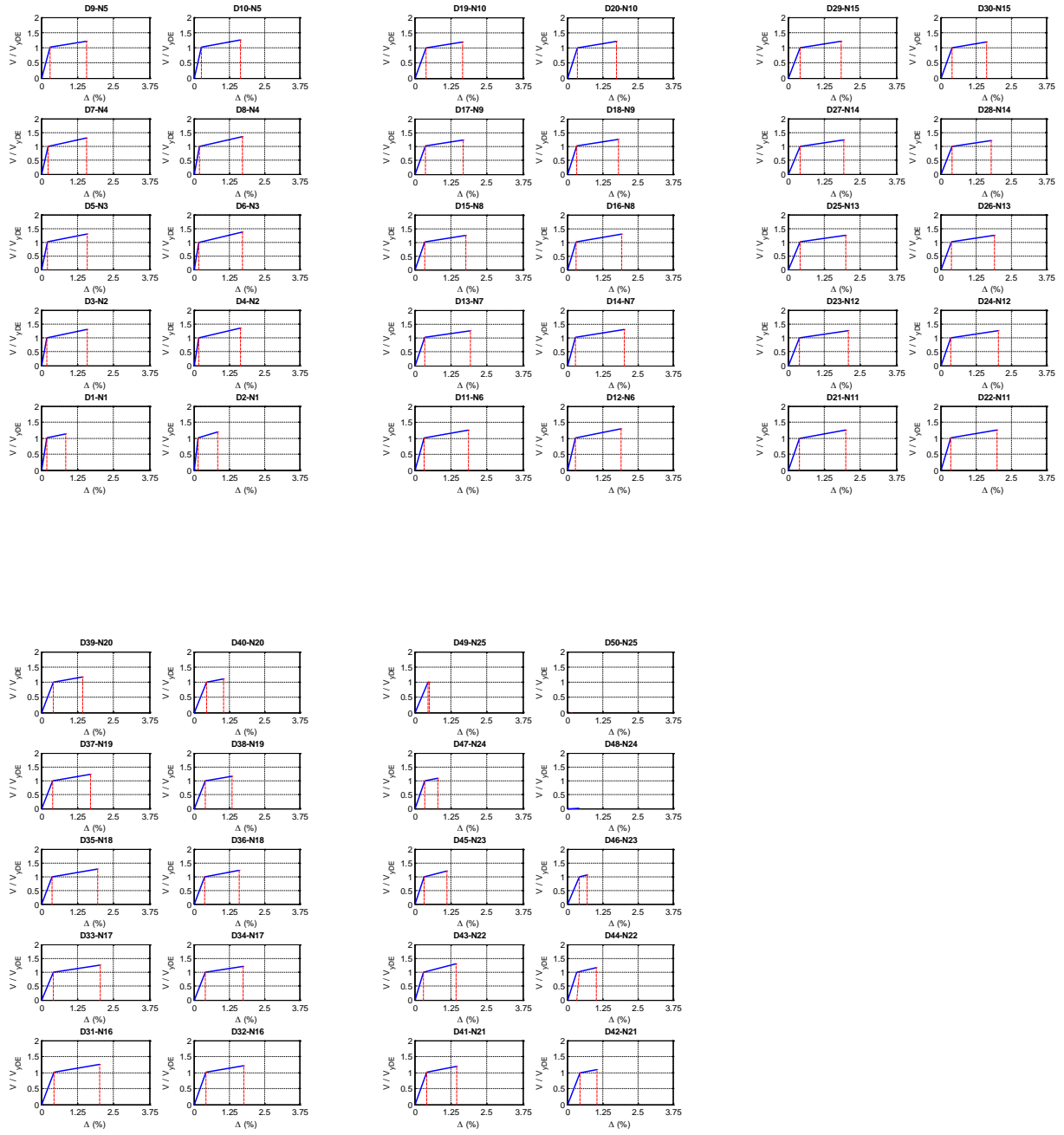


Figura A.375 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 3\%$

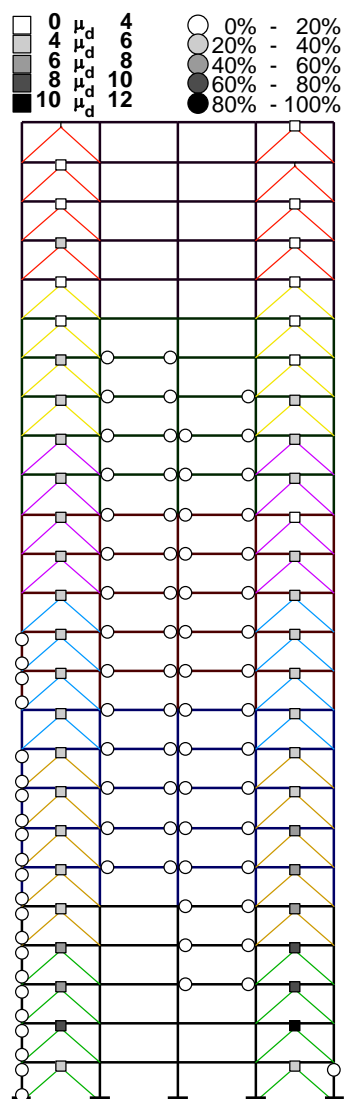
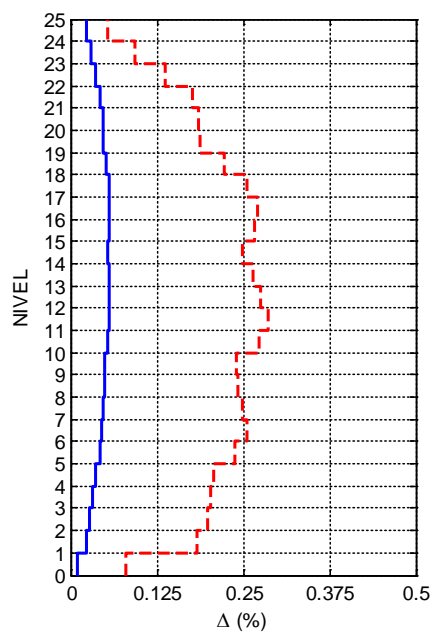
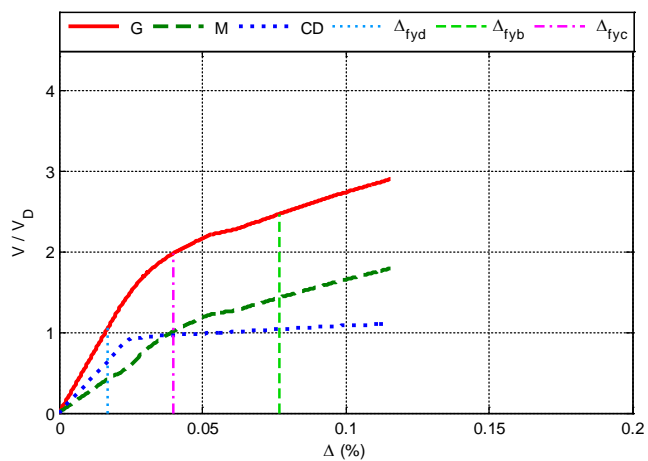


Figura A.376 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

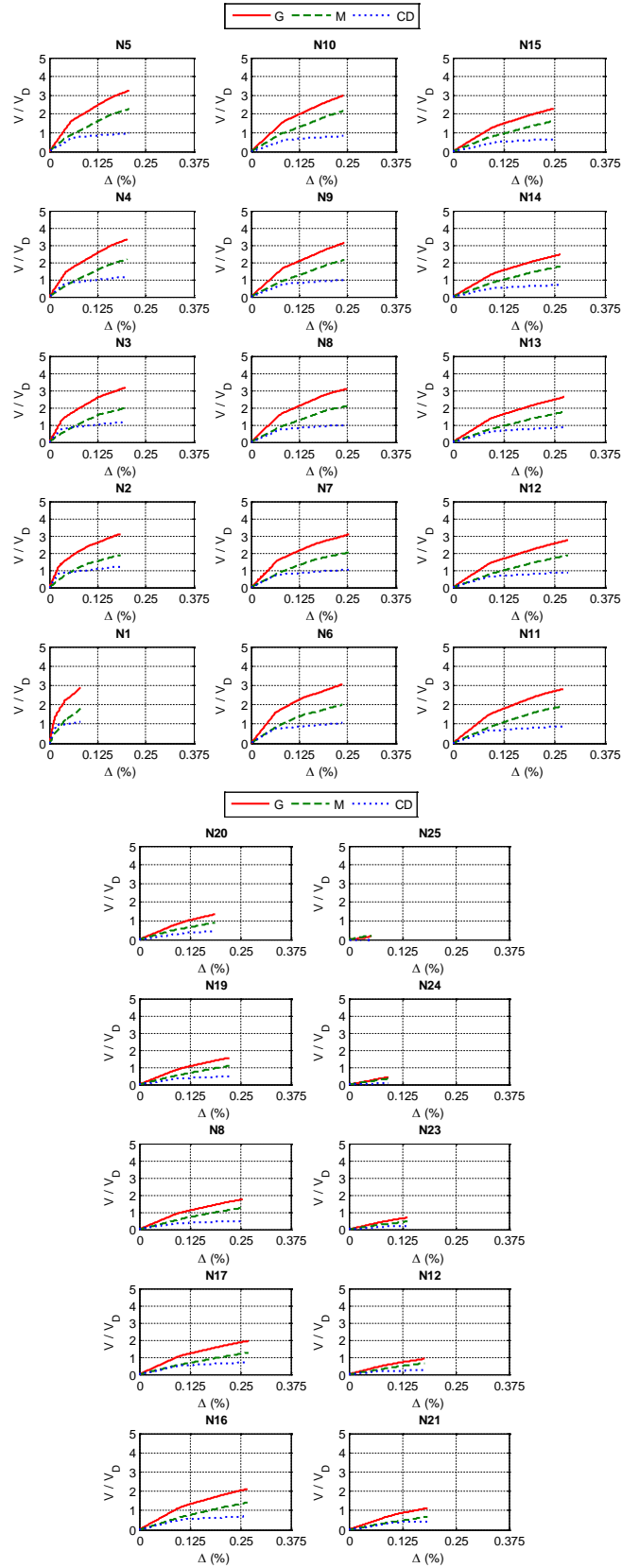


Figura A.377 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.378 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.75$ y $K_2 = 5\%$

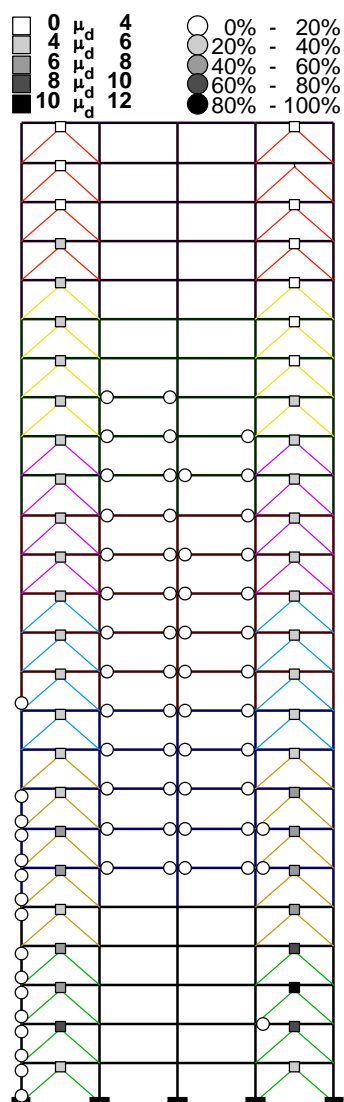
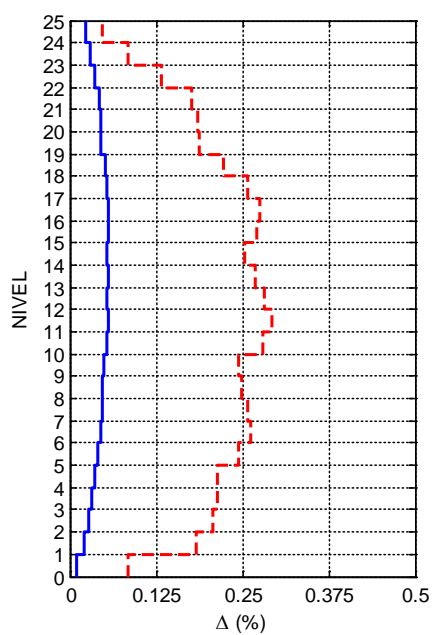
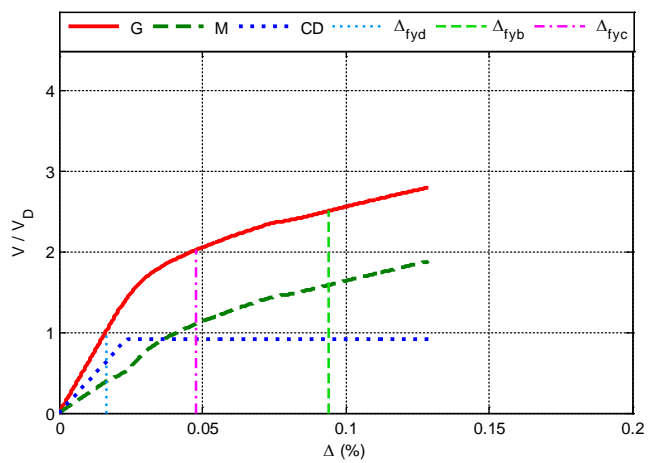


Figura A.379 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

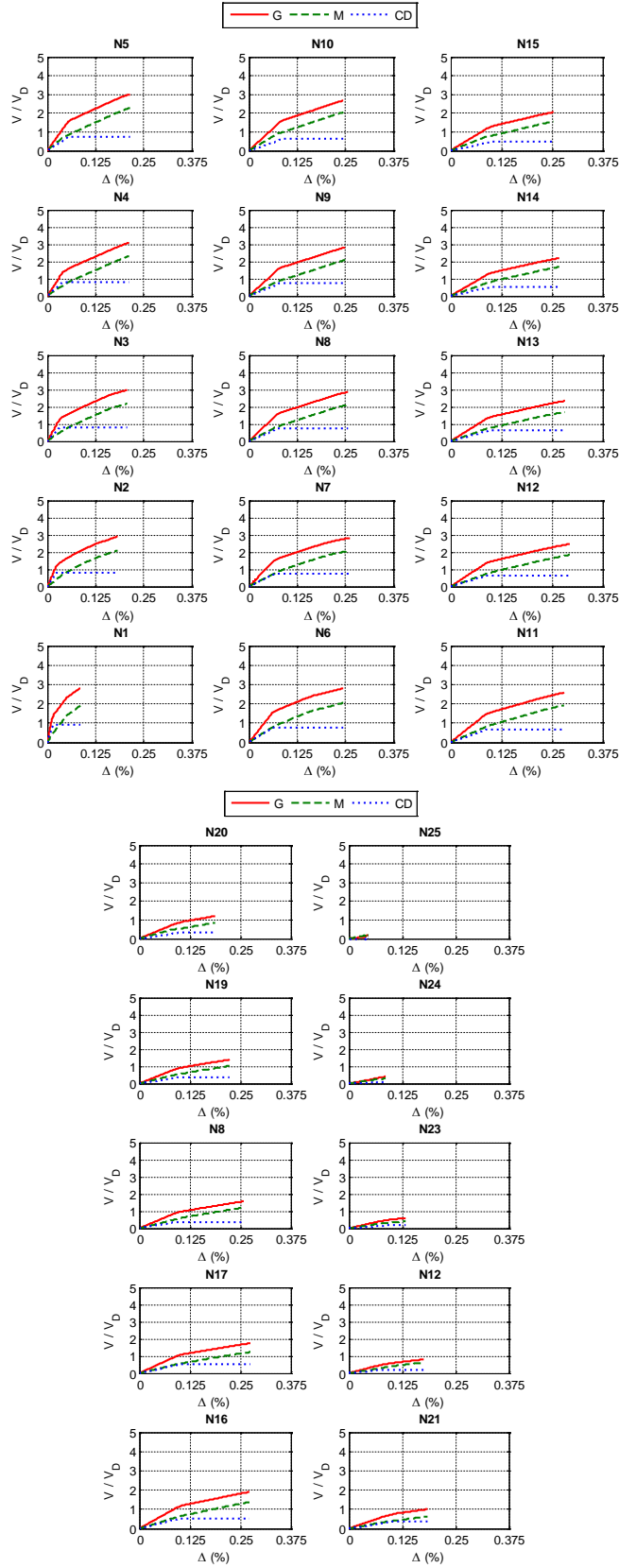


Figura A.380 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

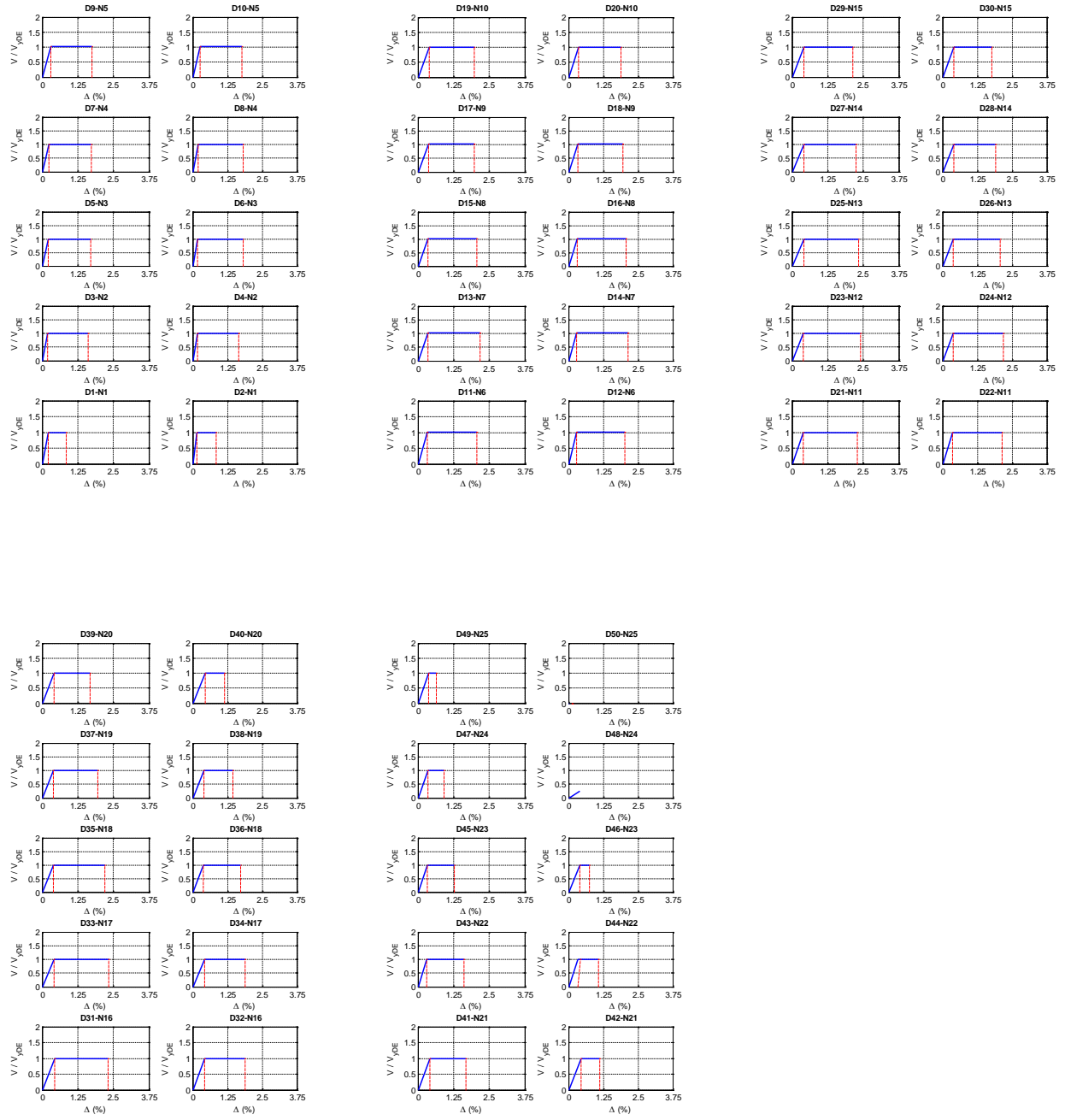


Figura A.381 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 0\%$

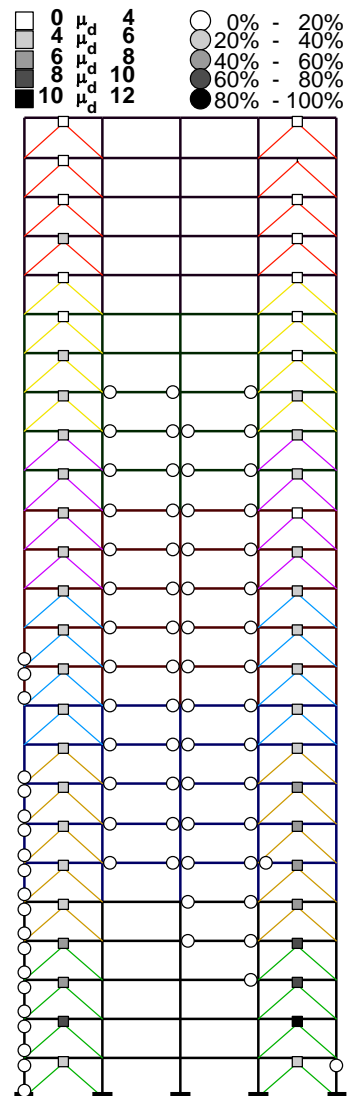
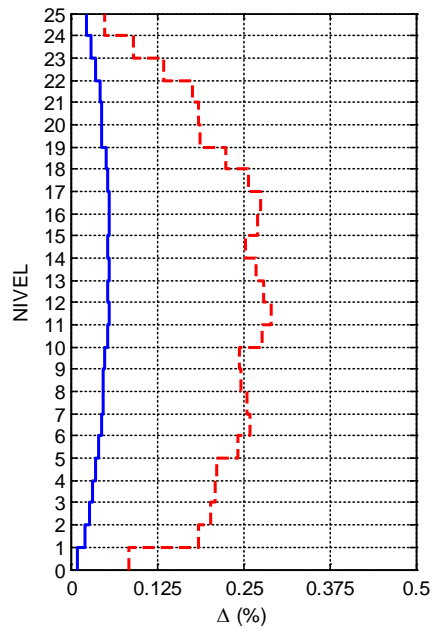
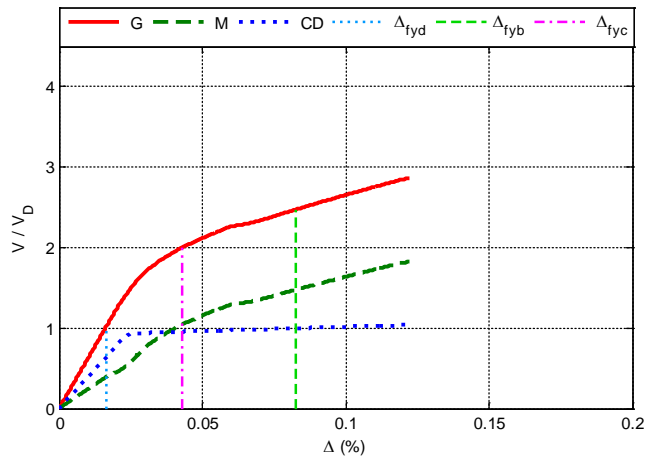


Figura A.382 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

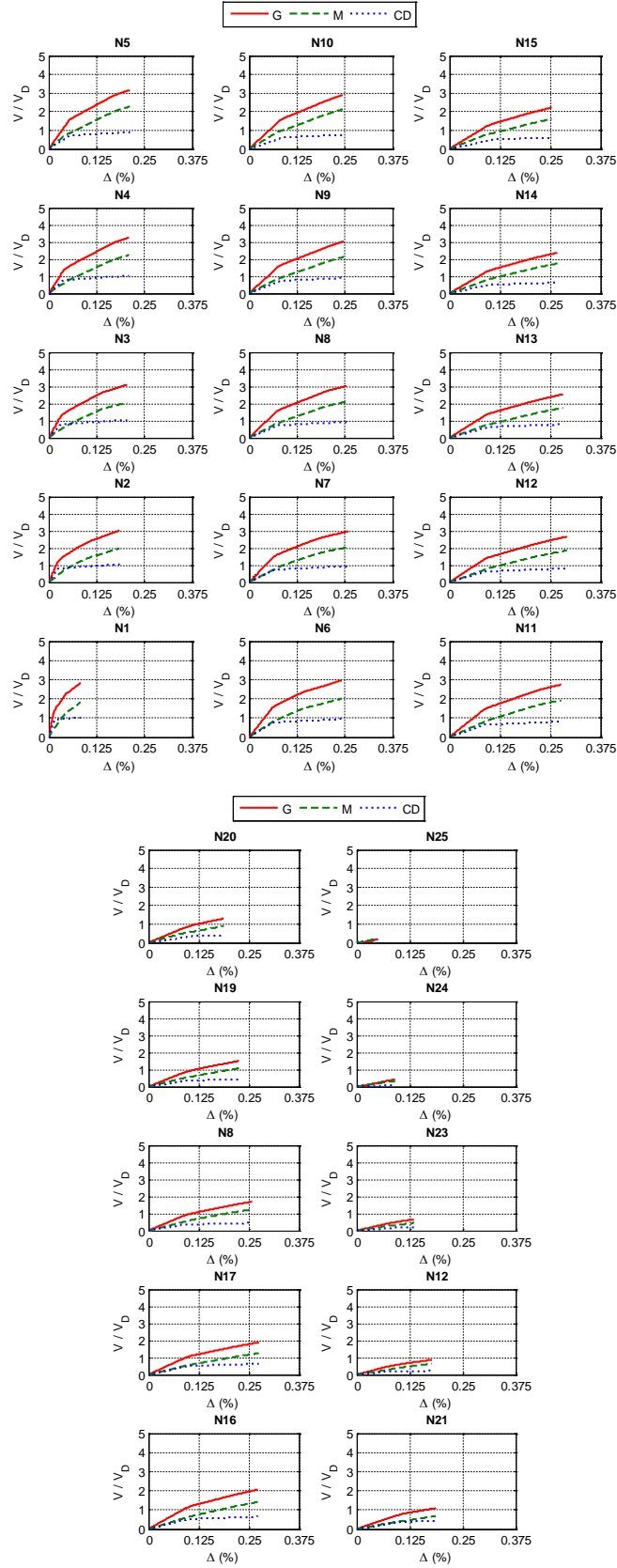


Figura A.383 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

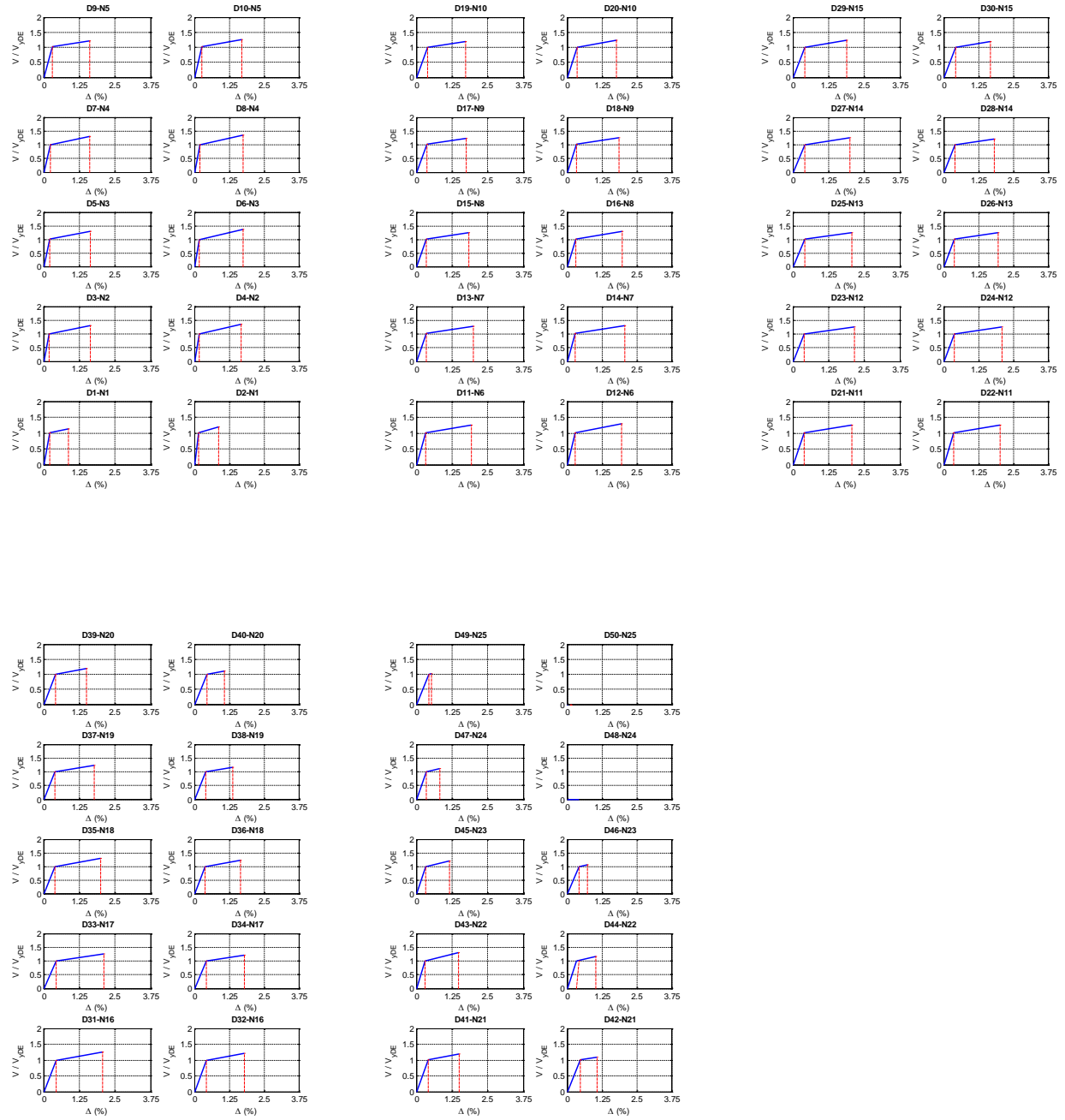


Figura A.384 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 3\%$

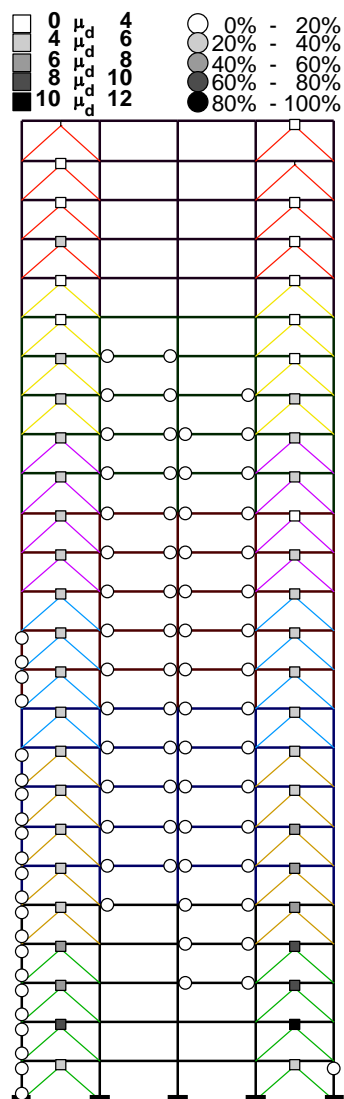
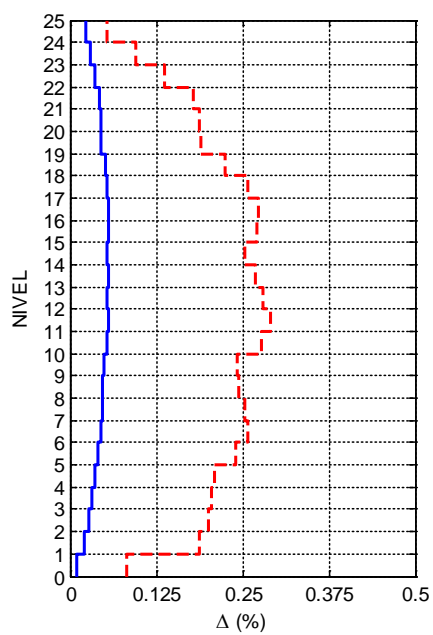
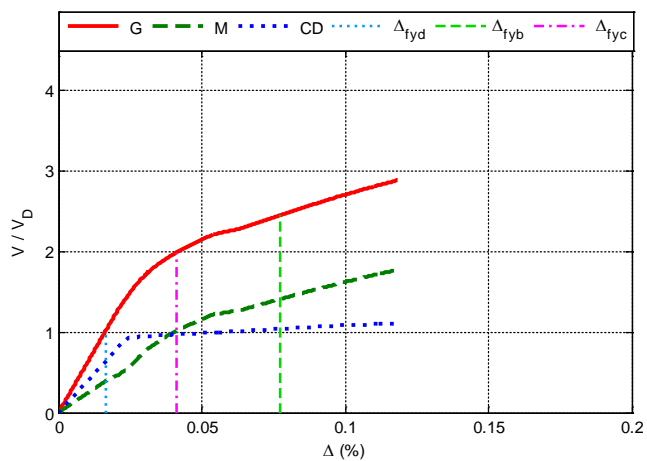


Figura A.385 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

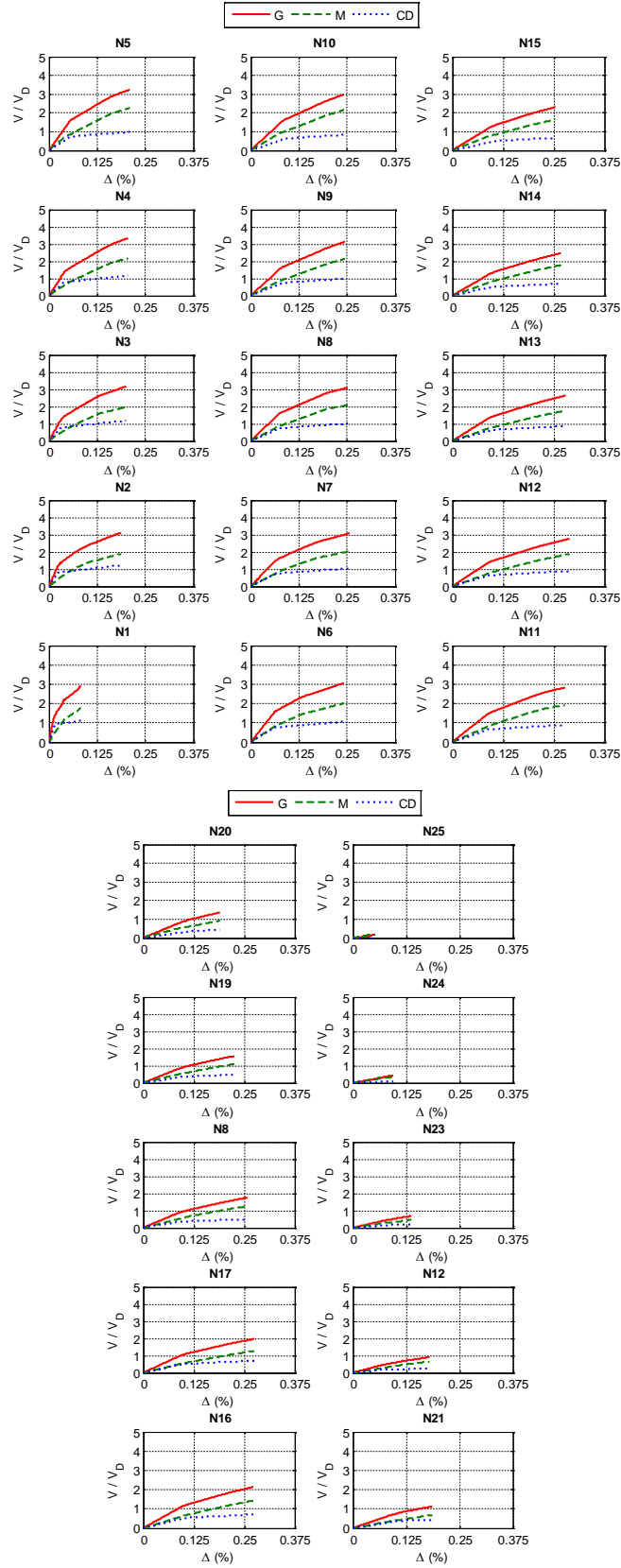


Figura A.386 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.387 $N = 25$, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.5$ y $K_2 = 5\%$

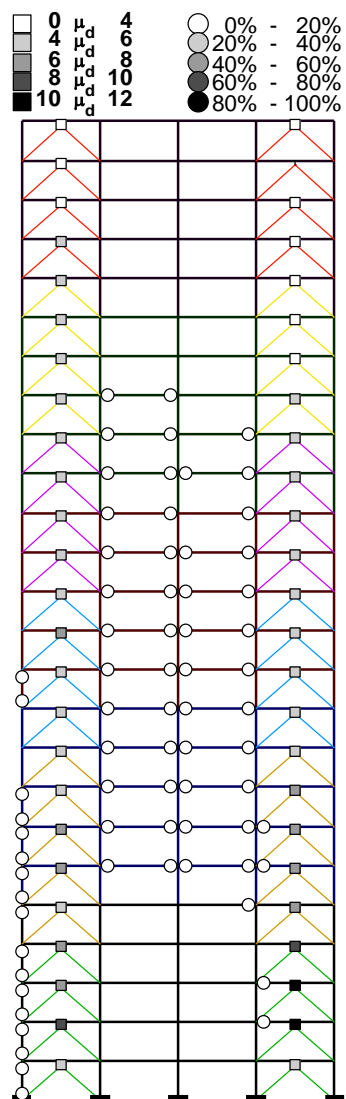
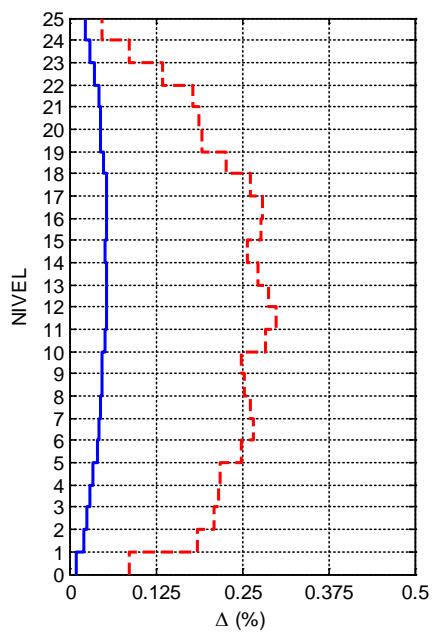
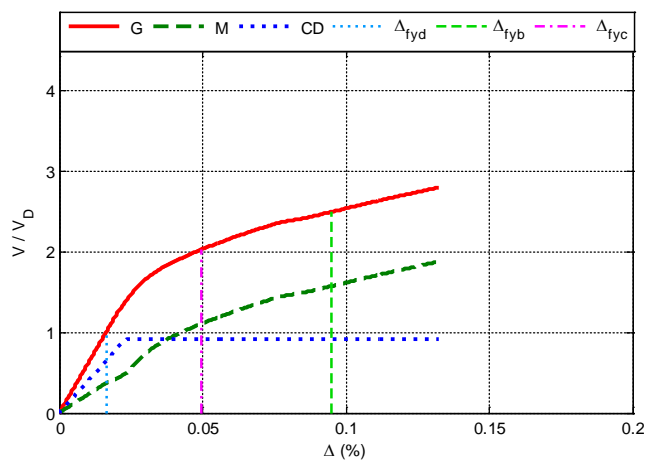


Figura A.388 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

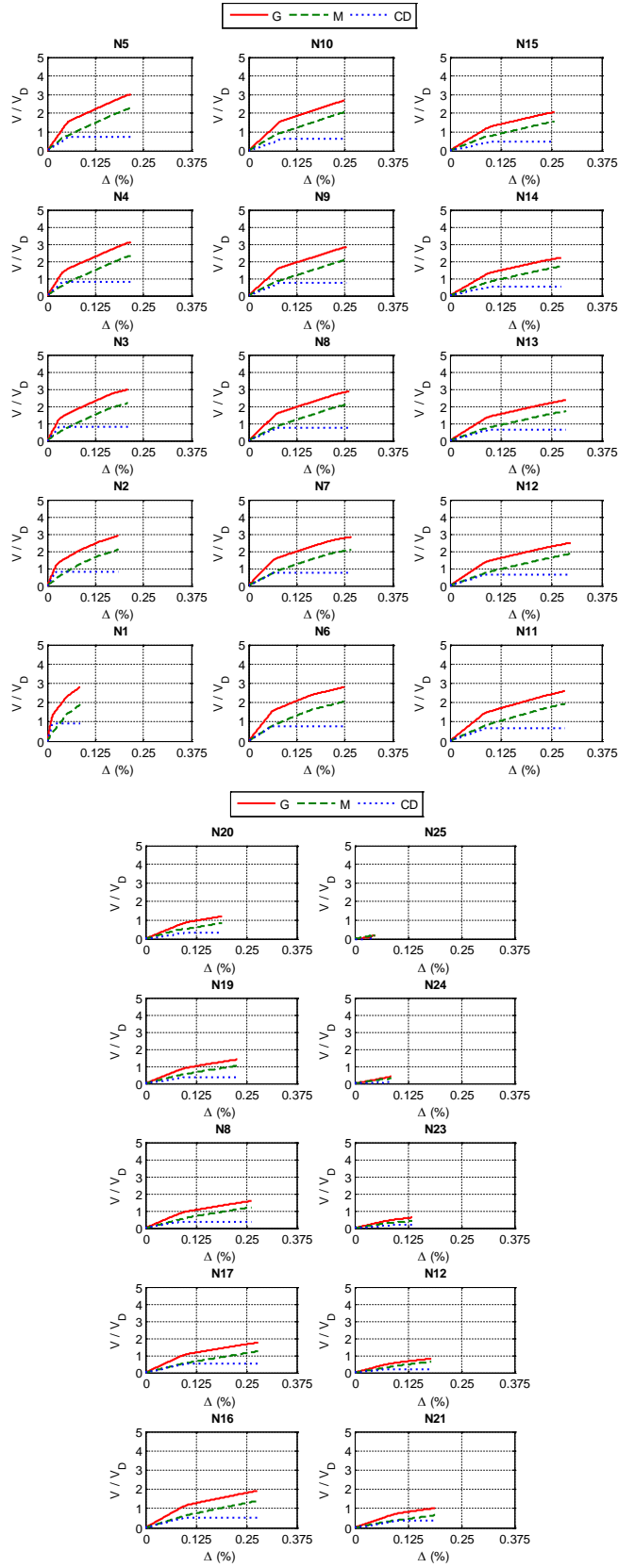


Figura A.389 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

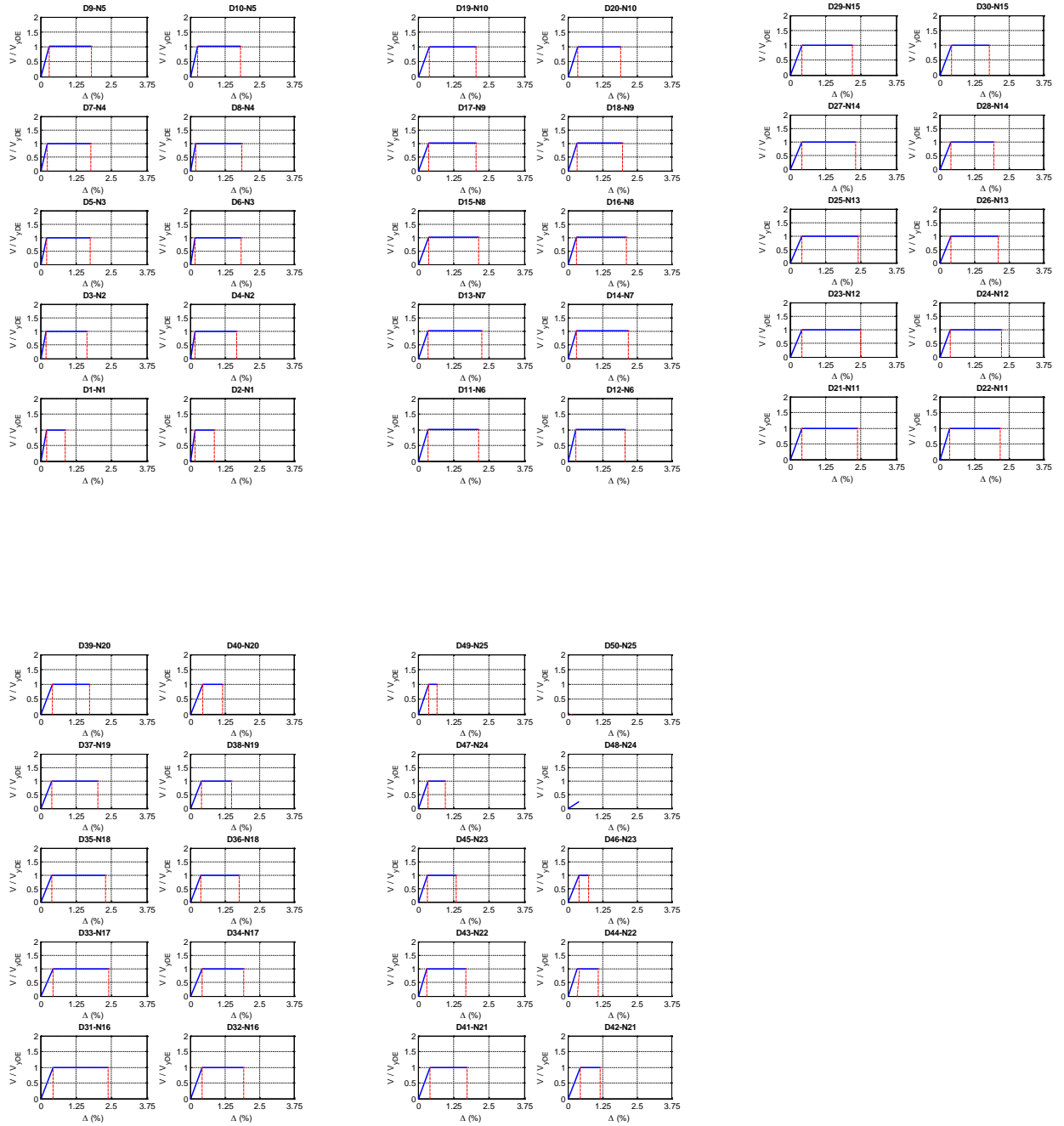


Figura A.390 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 0\%$

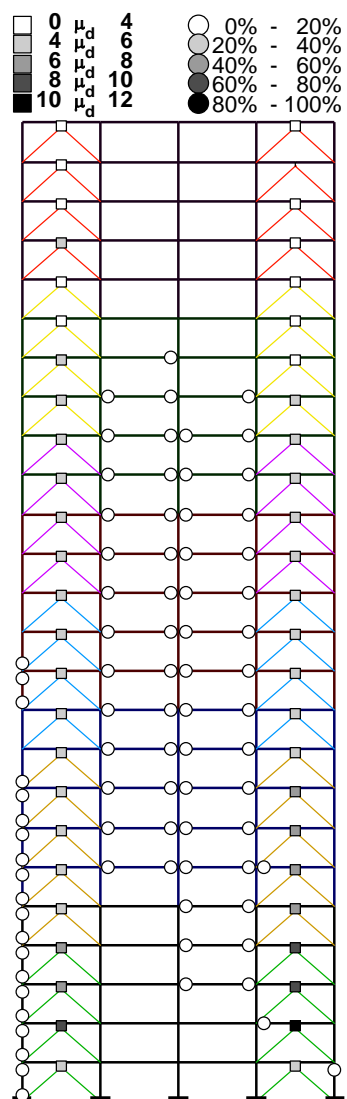
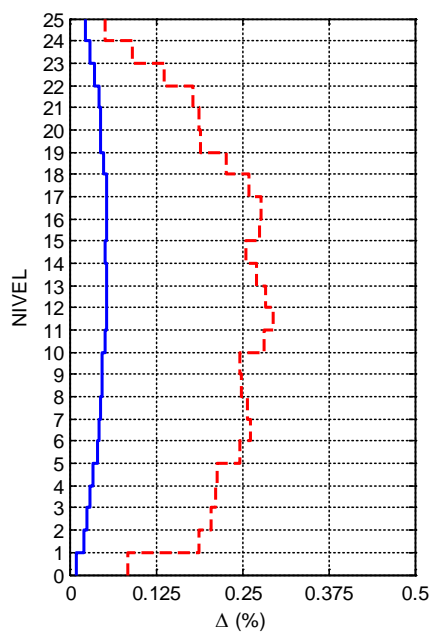
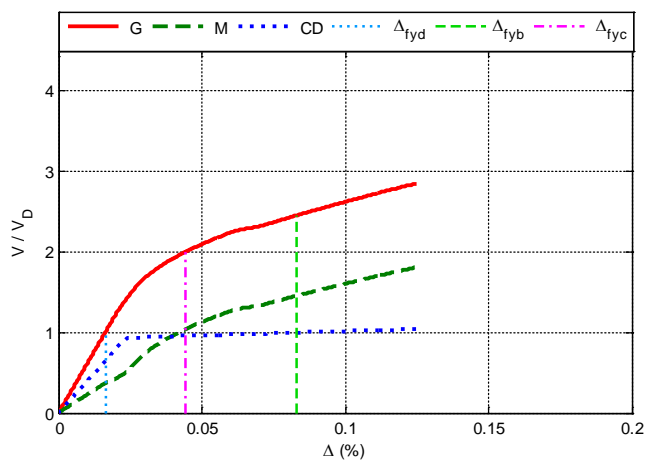


Figura A.391 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

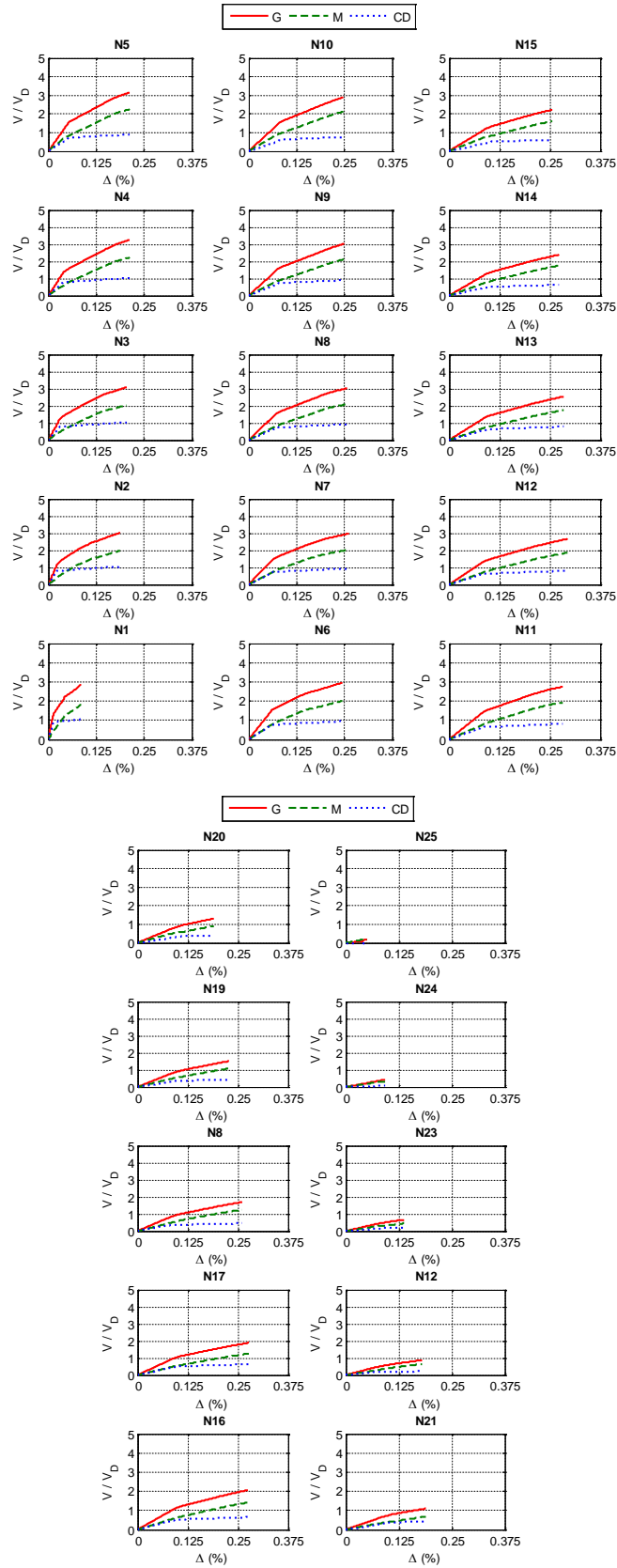


Figura A.392 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$



Figura A.393 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 3\%$

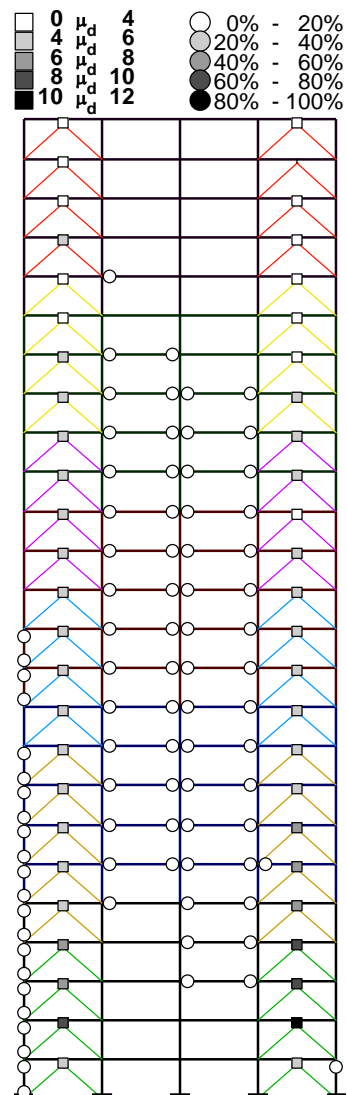
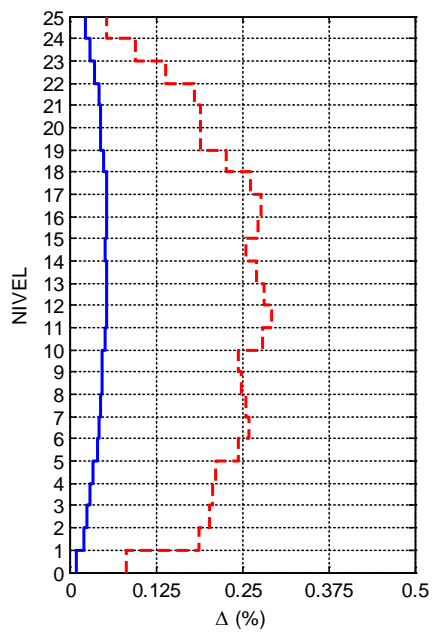
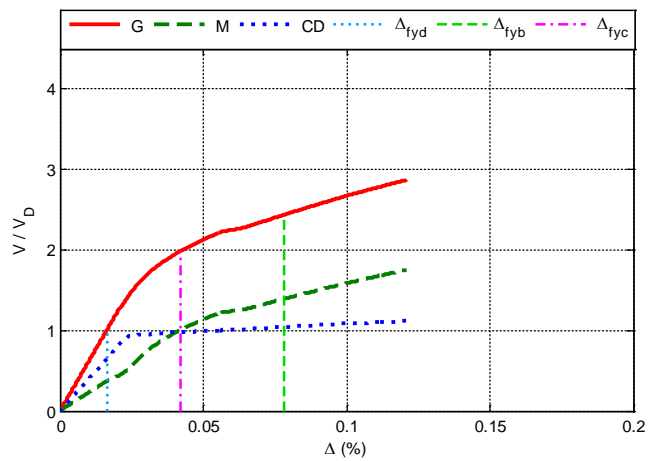


Figura A.394 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

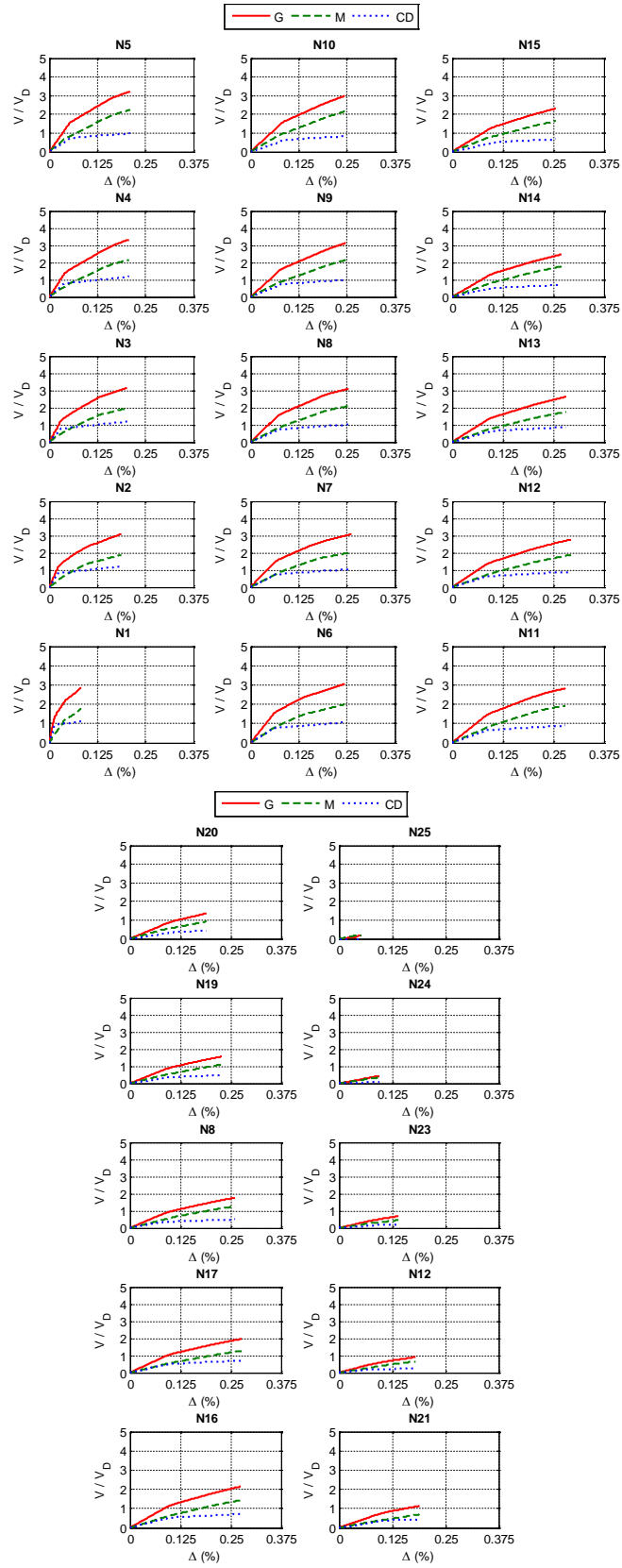


Figura A.395 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$



Figura A.396 $N = 25, \alpha = 0.25, \beta = 0.25$ y $K_2 = 5\%$

APÉDICE B

DETALLE DE LOS ARMADOS Y SECCIONES

5 Niveles $\alpha=0.75$

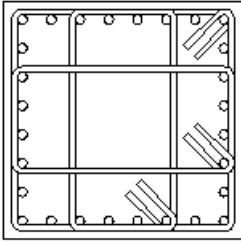
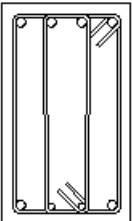








<p>C1 65 x 65 cm</p>  <p>8 #8 2 #8 2 #8 2 #8 2 #8 2 #8 2 #8 8 #8</p> <p>4 E #5 @ 10 cm</p>	<p>V1 65 x 35 cm</p>  <p>4 #8 2 #8 + 2 #6</p> <p>4 E #3 @ 10 cm</p>
<p>$\beta=1.0$</p> <p>OR 152 x 4.8 OR 127 x 4.8</p>  	<p>$\beta=0.75$</p> <p>OR 152 x 6.3 OR 127 x 6.3</p>  
<p>$\beta=0.5$</p> <p>OR 152 x 9.5 OR 154 x 7.9</p>  	<p>$\beta=0.25$</p> <p>OR 203 x 15.8 OR 203 x 12.7</p>  

Figura B.1

5 Niveles $\alpha=0.5$

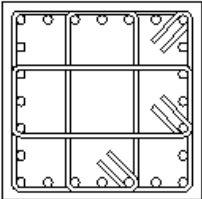
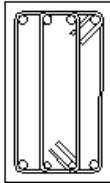






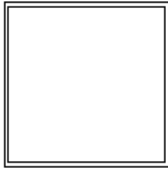
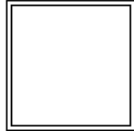
<p>C1 55 x 55 cm</p>  <p>7 # 8 2 # 8 2 # 8 2 # 8 2 # 8 2 # 8 7 # 8</p> <p>4 E #4 @ 10 cm</p>	<p>V1 50 x 30 cm</p>  <p>4 # 8 2 # 8 + 2 # 6</p> <p>4 E #3 @ 10 cm</p>
<p>$\beta=1.0$</p> <p>OR 203 x 4.8 OR 178 x 4.8</p>  	<p>$\beta=0.75$</p> <p>OR 203 x 6.4 OR 178 x 6.4</p>  
<p>$\beta=0.5$</p> <p>OR 203 x 9.5 OR 178 x 9.5</p>  	<p>$\beta=0.25$</p> <p>OR 457 x 12.7 OR 356 x 12.7</p>  

Figura B.2

5 Niveles $\alpha=0.25$

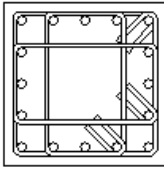
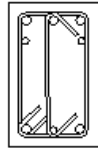




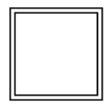
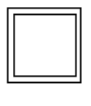
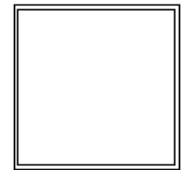
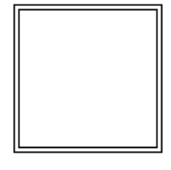
<p>C1 45 x 45 cm</p>  <p>5 # 8 2 # 8 2 # 8 2 # 8 5 # 8</p> <p>4 E #4 @ 10 cm</p>	<p>V1 40 x 25 cm</p>  <p>4 # 8 2 # 8 2 # 8 + 1 # 6</p> <p>3 E #3 @ 10 cm</p>
<p>$\beta=1.0$</p> <p>OR 203 x 7.9 OR 178 x 7.9</p>  	<p>$\beta=0.75$</p> <p>OR 178 x 12.7 OR 154 x 12.7</p>  
<p>$\beta=0.5$</p> <p>OR 254 x 12.7 OR 203 x 15.8</p>  	<p>$\beta=0.25$</p> <p>OR 457 x 12.7 OR 406 x 12.7</p>  

Figura B.3

10 Niveles $\alpha=0.75$

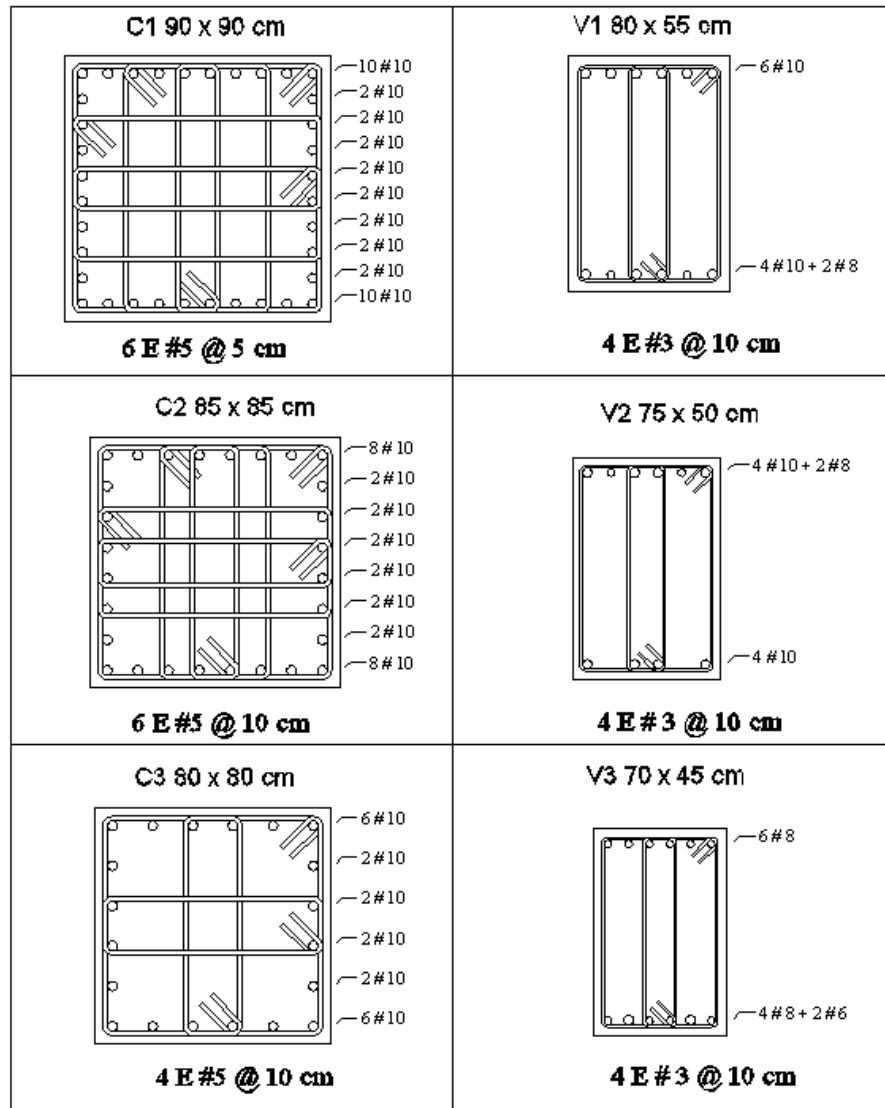


Figura B.4

10 Niveles $\alpha=0.75$

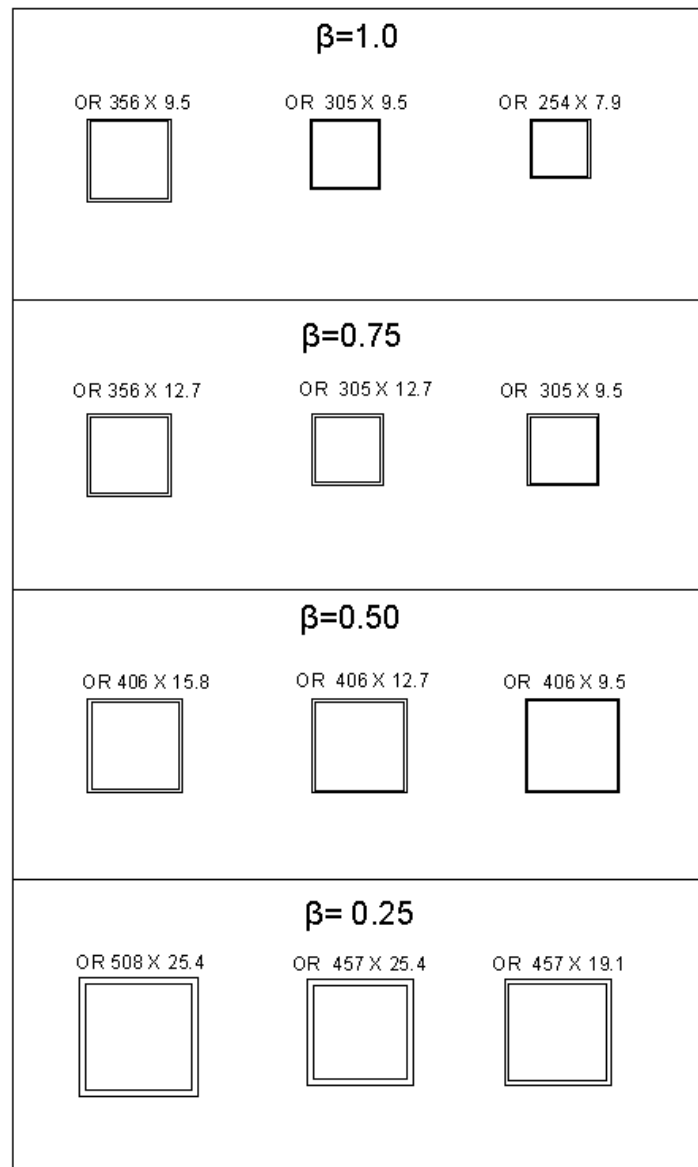


Figura B.5

10 Niveles $\alpha=0.5$

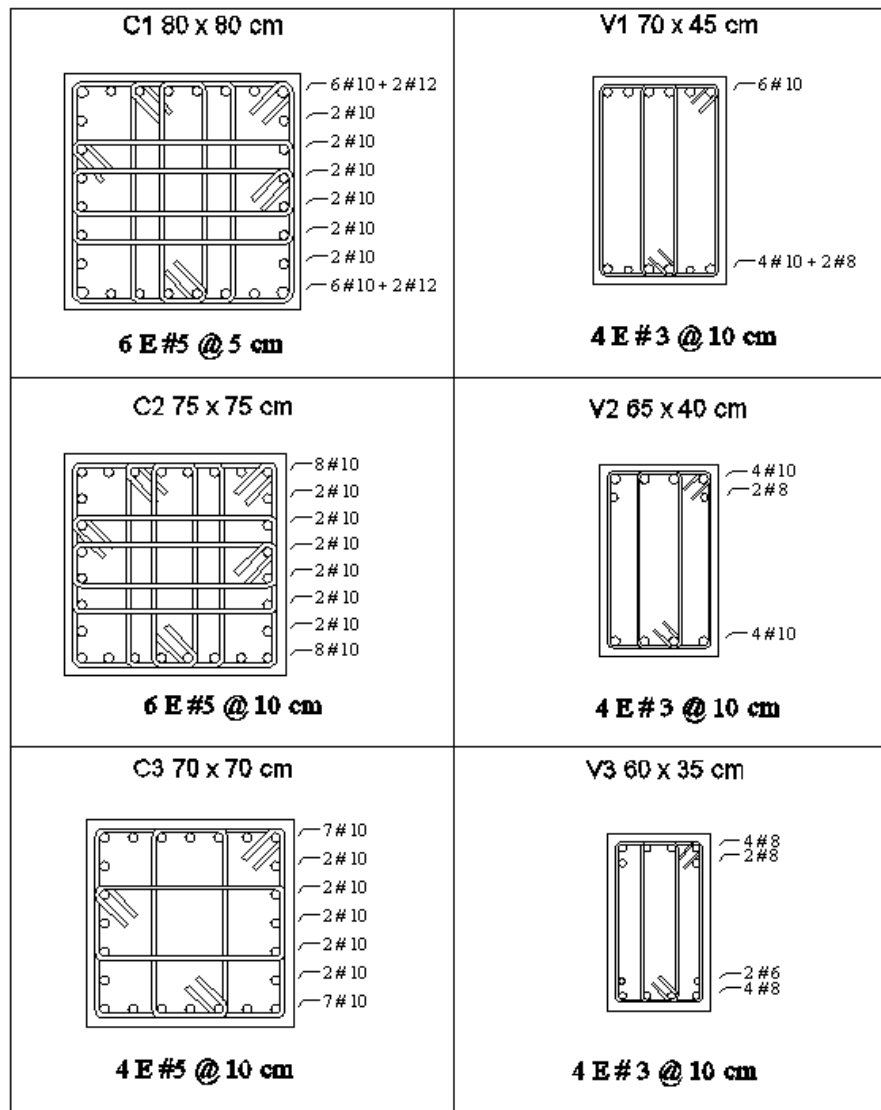


Figura B.6

10 Niveles $\alpha=0.5$

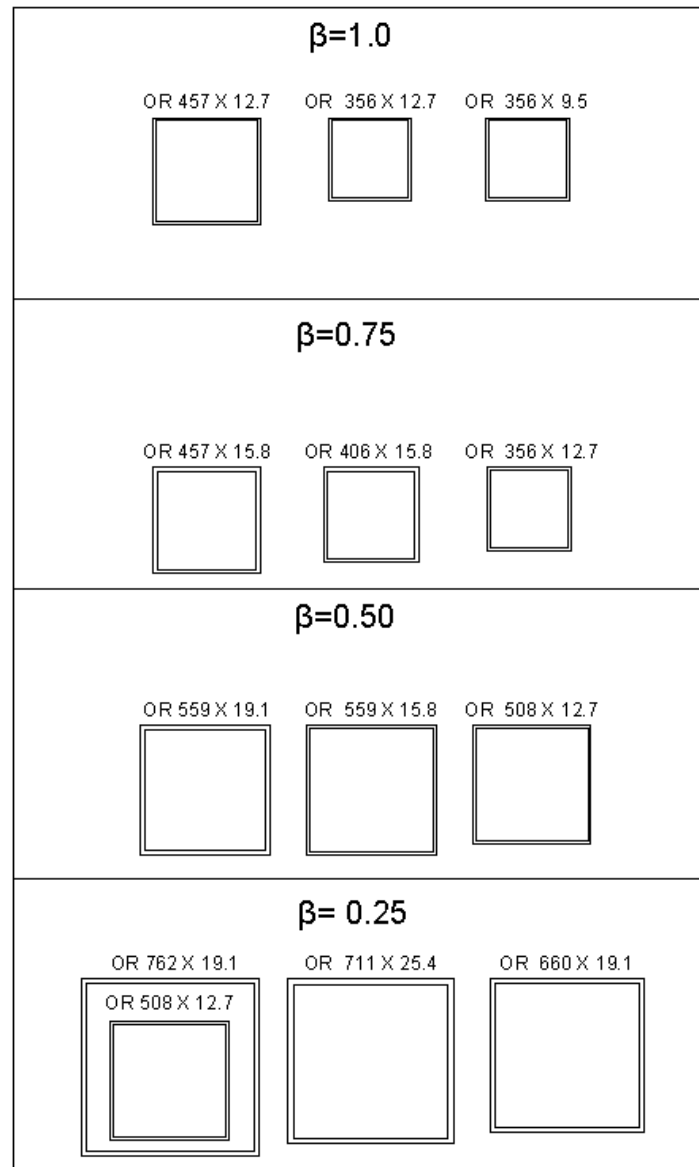


Figura B.7

10 Niveles $\alpha=0.25$

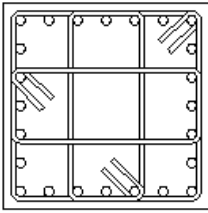
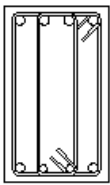
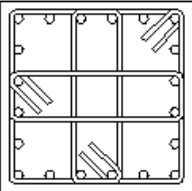

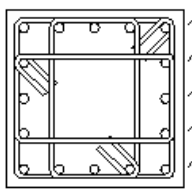
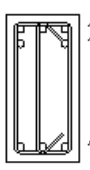
<p>C1 70 x 70 cm</p>  <p>7 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 7 #10</p> <p>4 E #5 @ 5 cm</p>	<p>V1 60 x 35 cm</p>  <p>4 #10 2 #10 + 2 #8</p> <p>4 E #3 @ 10 cm</p>
<p>C2 65 x 65 cm</p>  <p>6 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 6 #10</p> <p>6 E #5 @ 10 cm</p>	<p>V2 55 x 30 cm</p>  <p>3 #10 2 #6 3 #8</p> <p>3 E #3 @ 10 cm</p>
<p>C3 60 x 60 cm</p>  <p>5 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 2 #10 5 #10</p> <p>4 E #5 @ 10 cm</p>	<p>V2 55 x 30 cm</p>  <p>3 #8 2 #8 3 #8</p> <p>4 E #3 @ 10 cm</p>

Figura B.8

10 Niveles $\alpha=0.25$

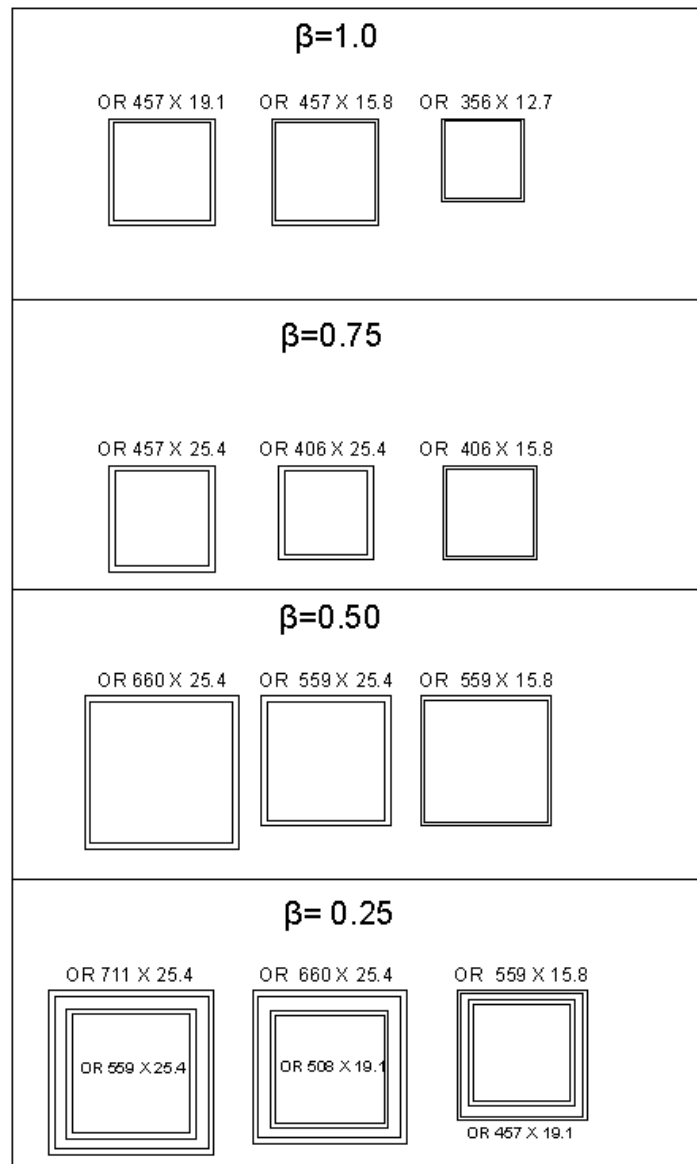


Figura B.9

15 Niveles $\alpha=0.75, \alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

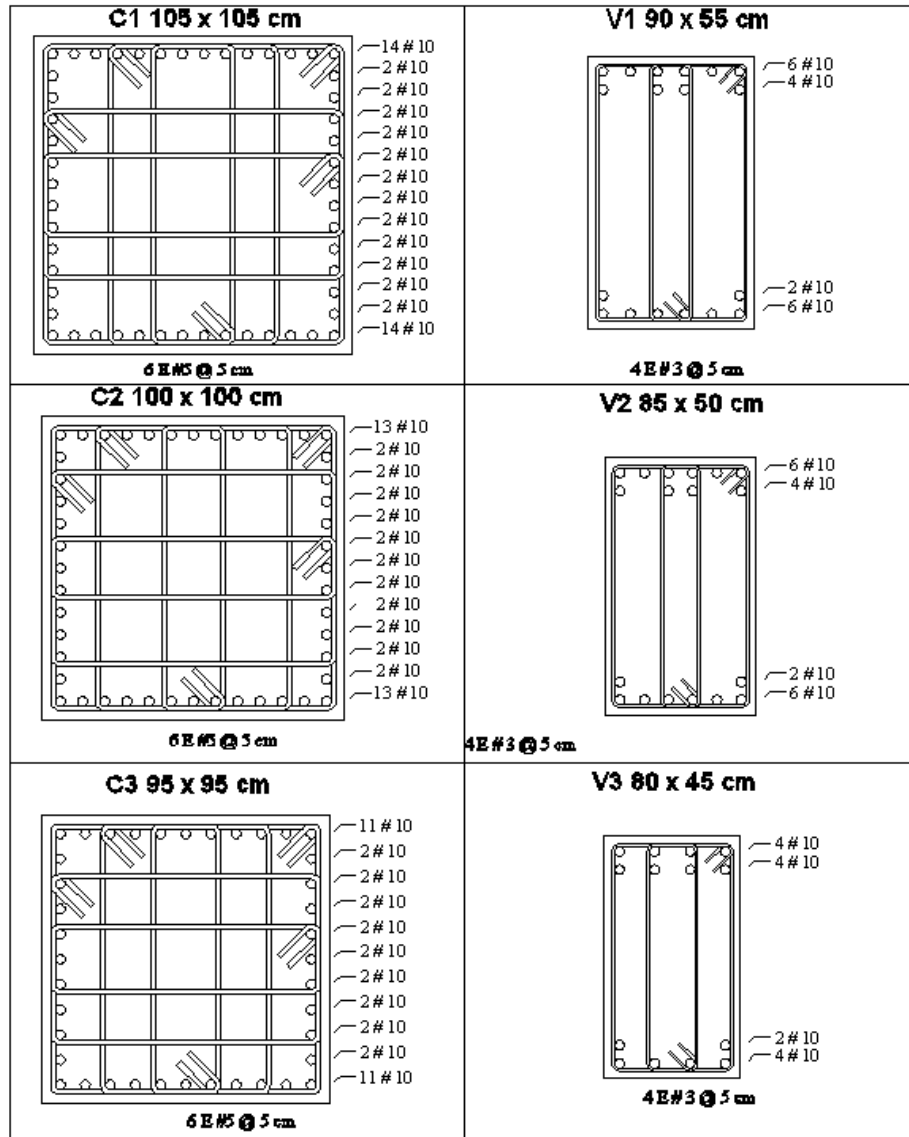


Figura B.10

15 Niveles $\alpha=0.75$

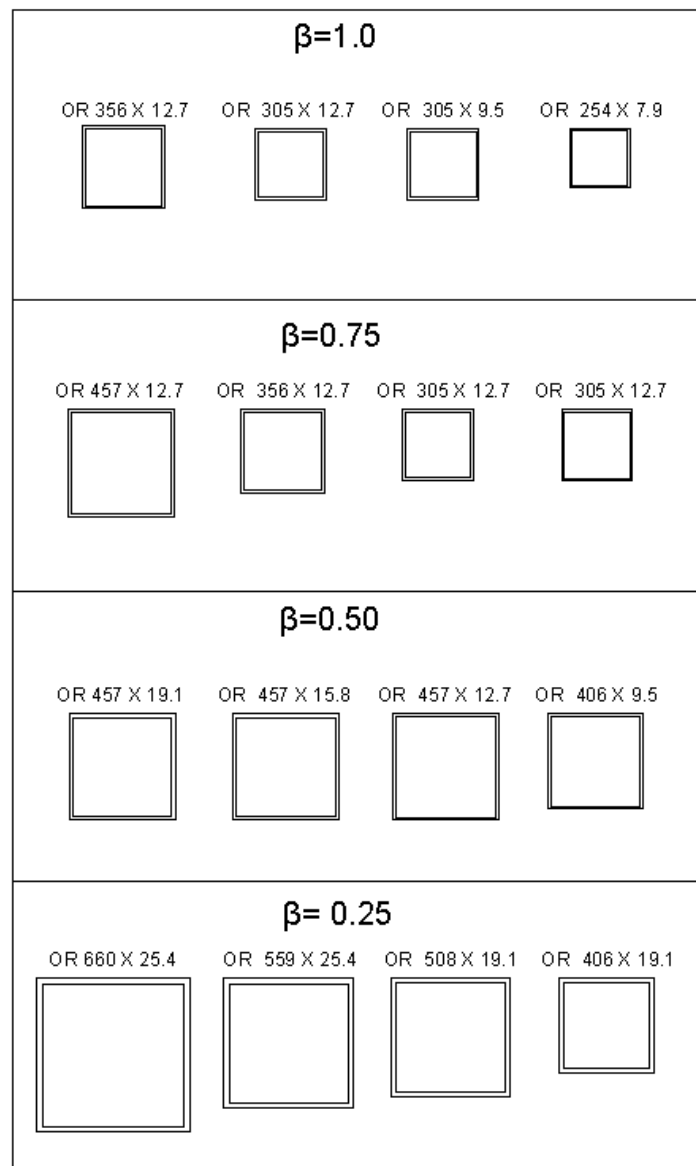


Figura B.11

15 Niveles $\alpha=0.5$

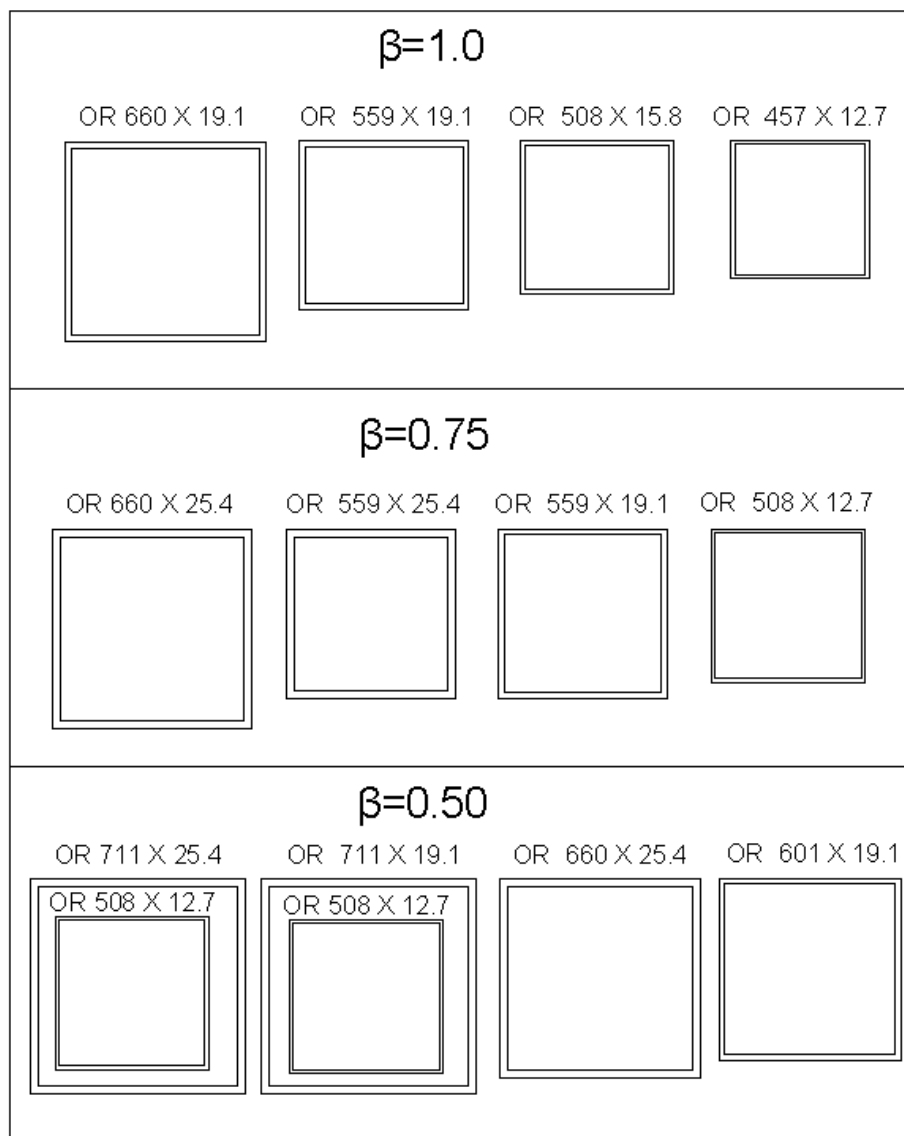


Figura B.12

15 Niveles $\alpha=0.25$

$\beta=1.0$

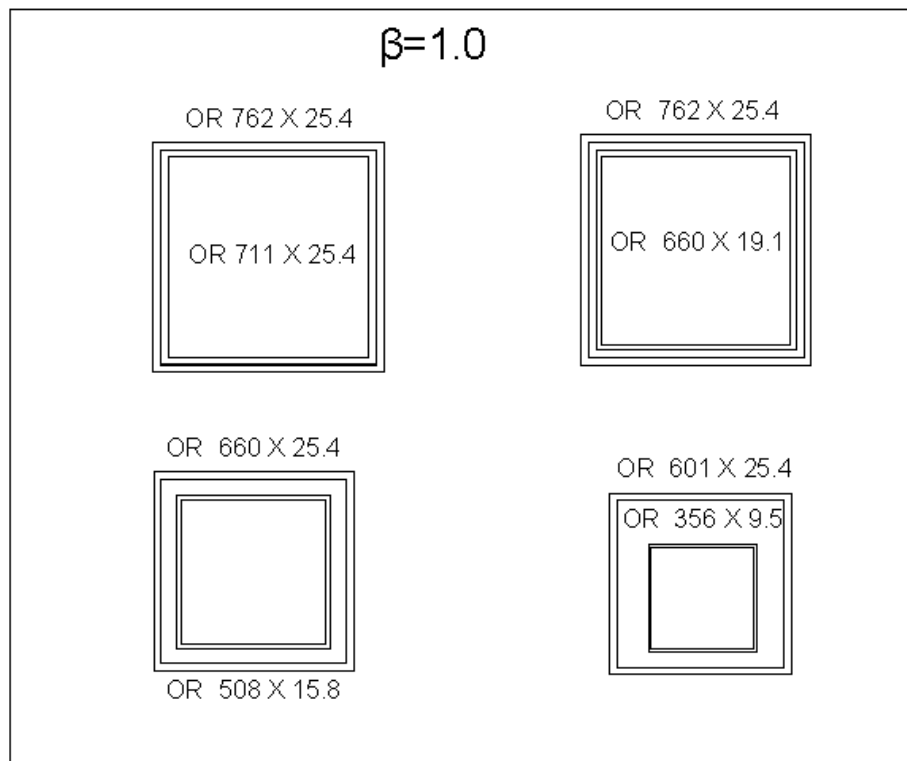


Figura B.13

20 Niveles, $\alpha=0.75, \alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

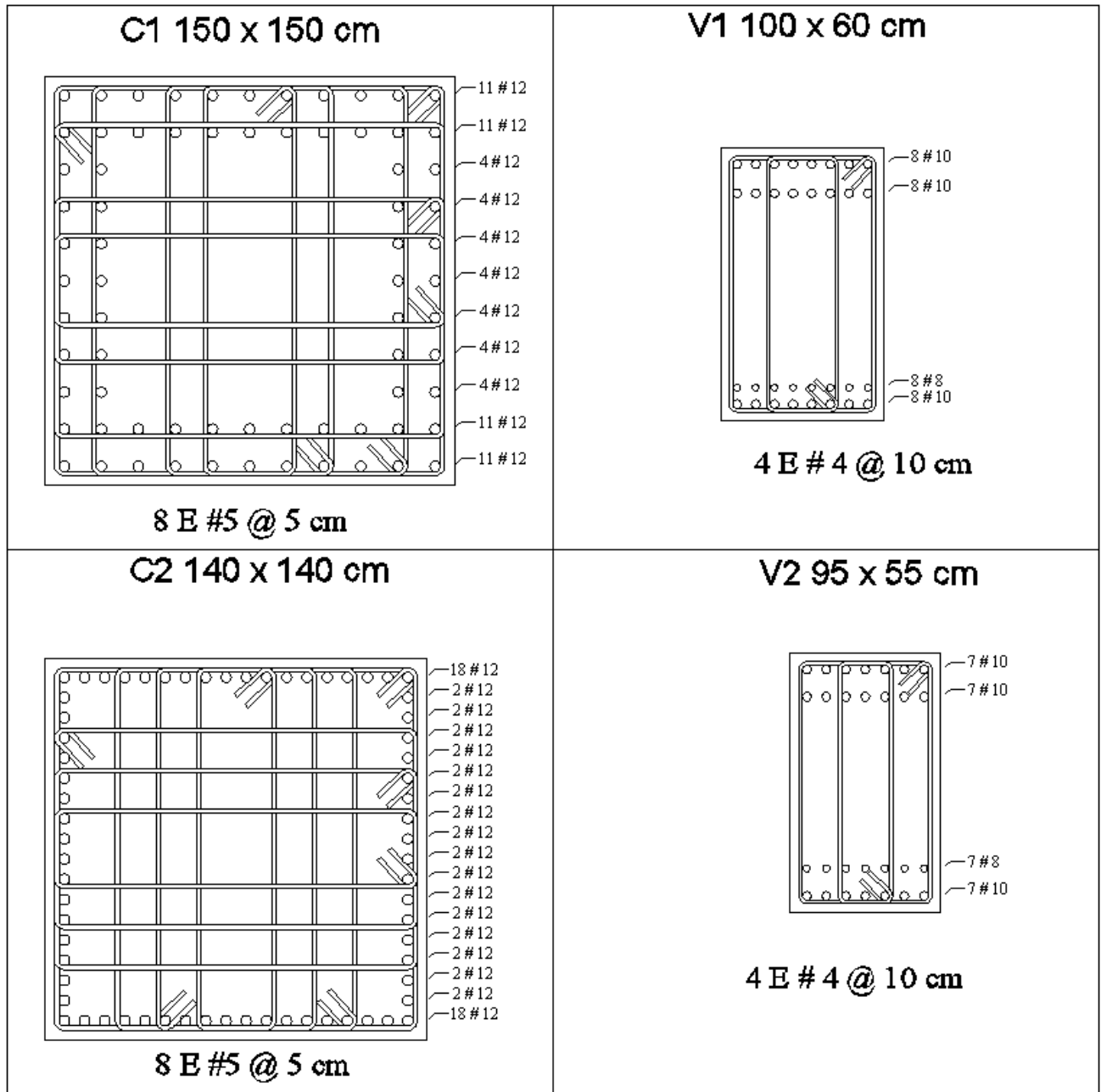


Figura B.14

20 Niveles, $\alpha=0.75, \alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

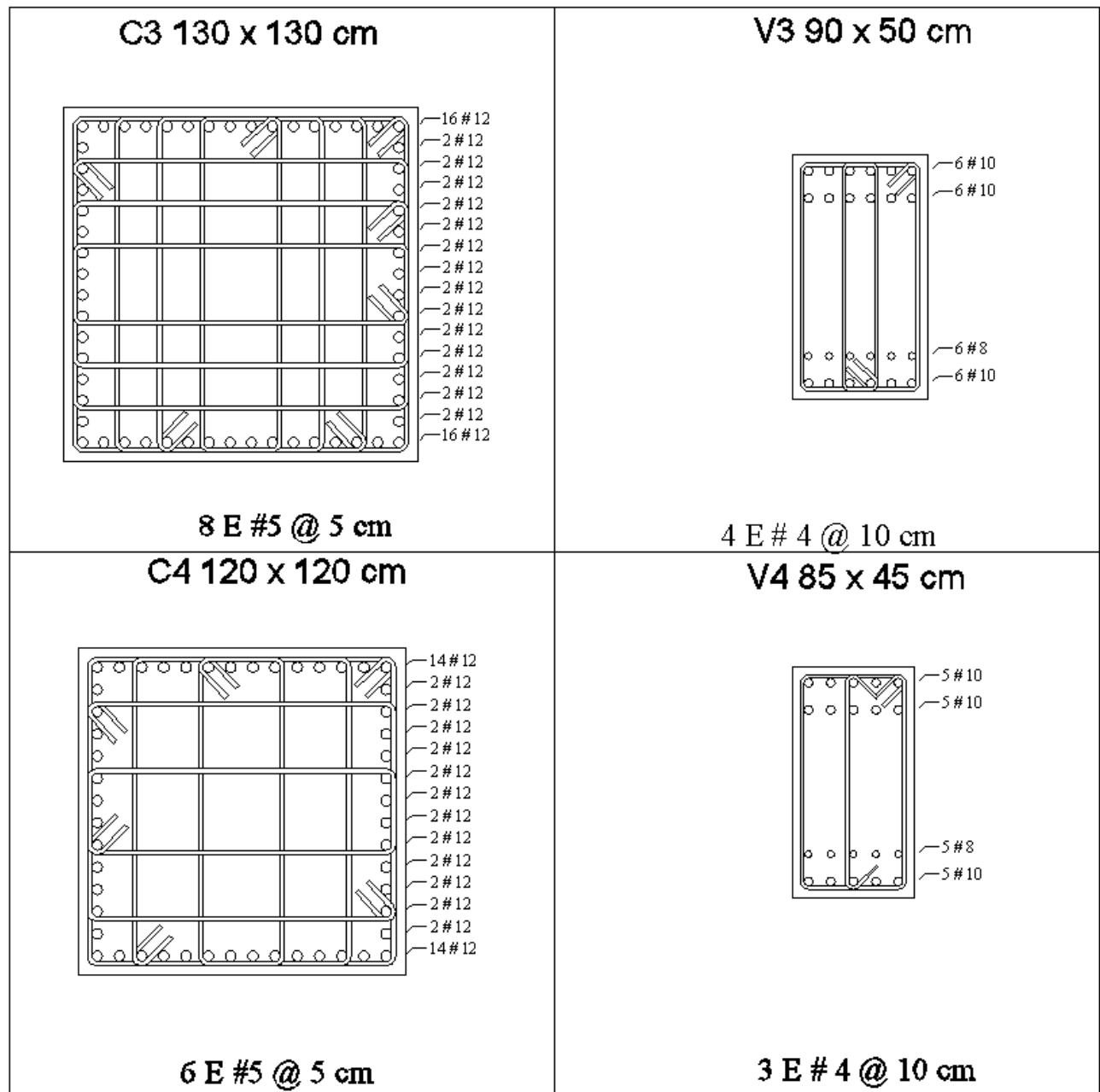


Figura B.15

20 Niveles $\alpha=0.75$

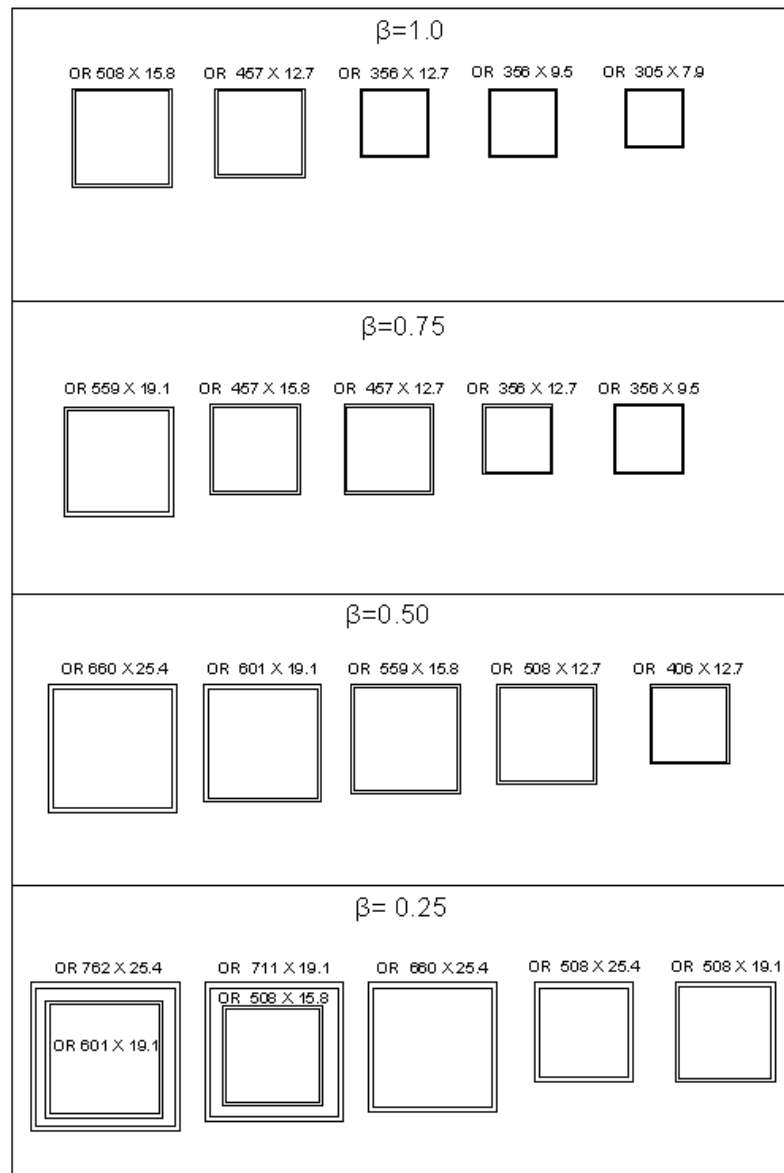


Figura B.16

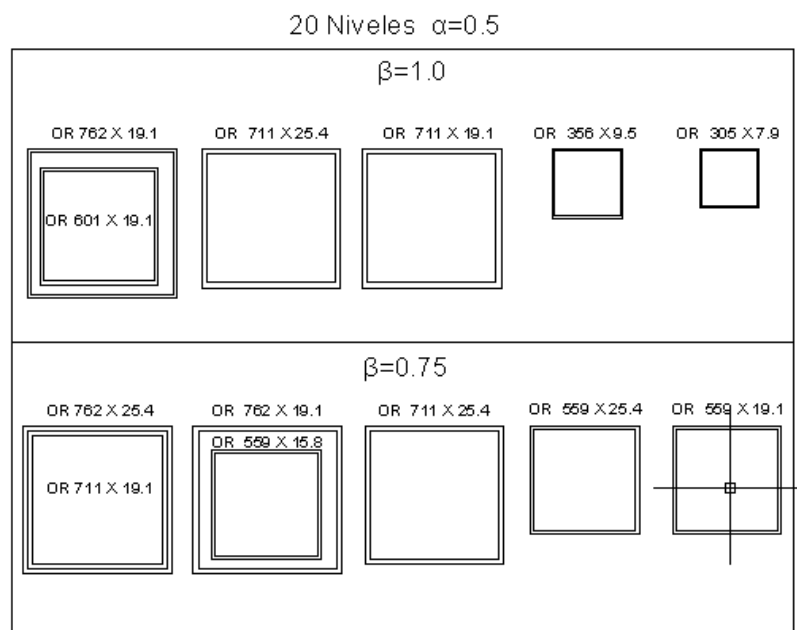


Figura B.17

25 Niveles, $\alpha=0.75, \alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

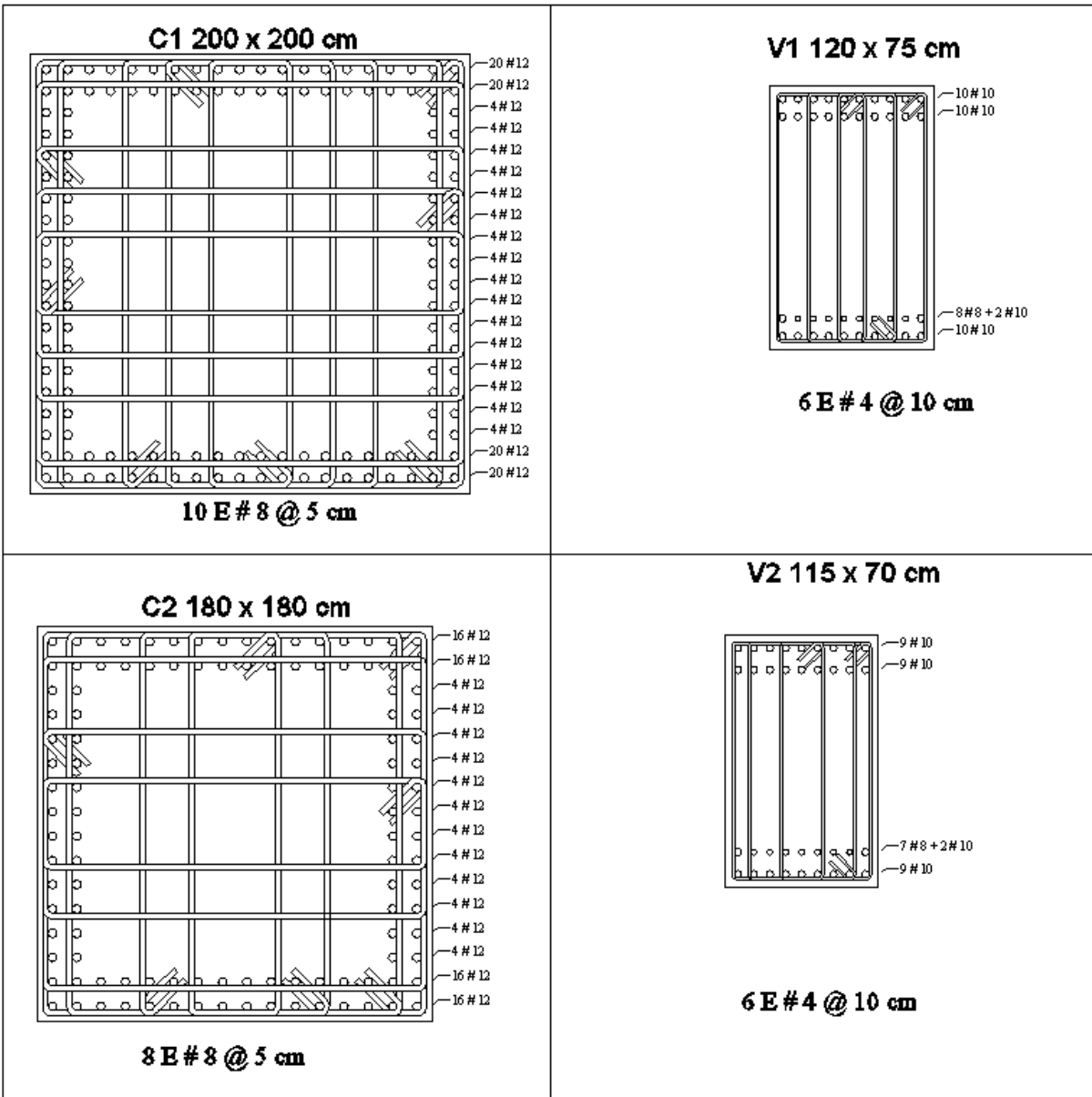


Figura B.18

25 Niveles, $\alpha=0.75$, $\alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

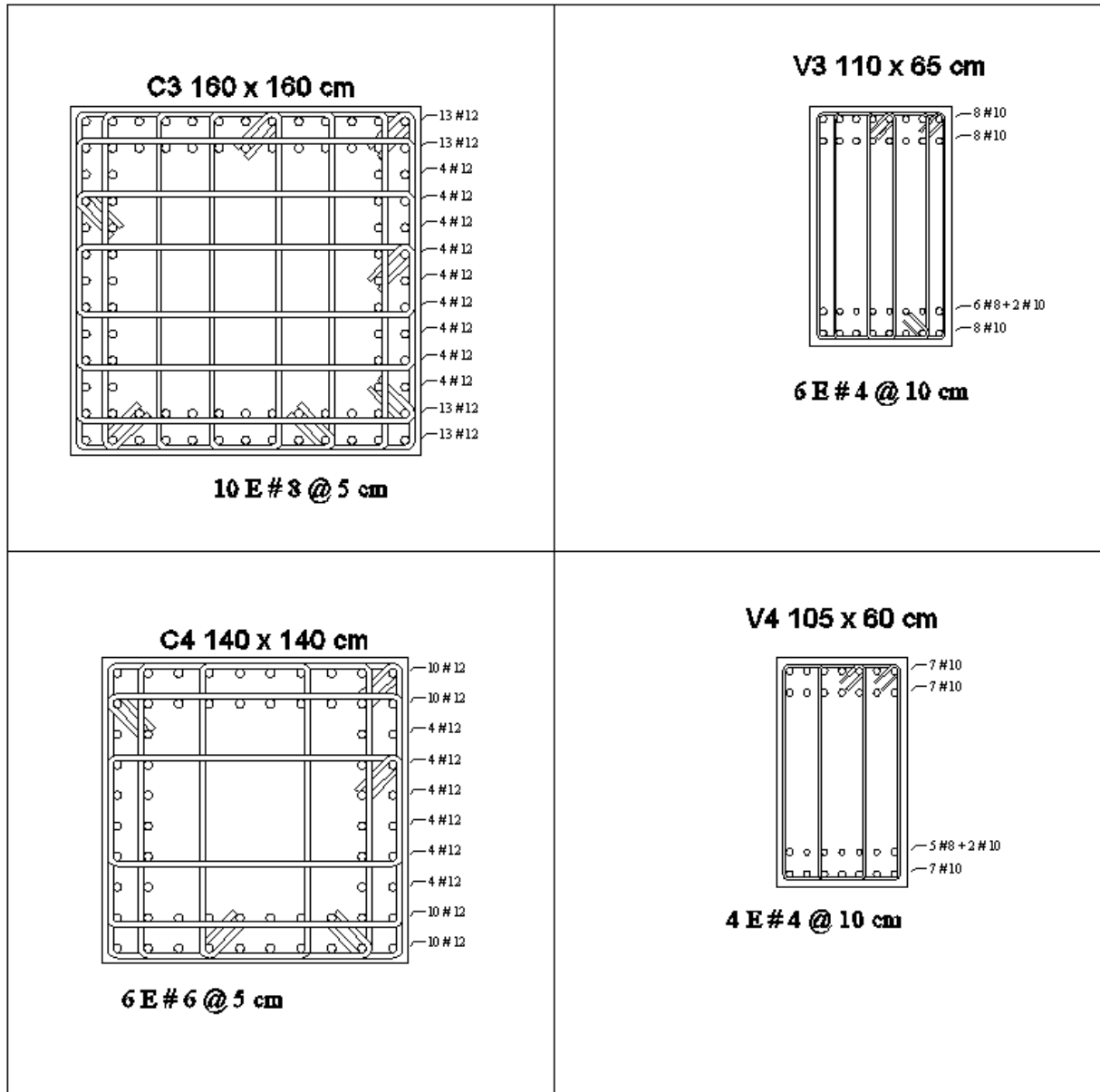


Figura B.19

25 Niveles, $\alpha=0.75, \alpha=0.5$ y $\alpha=0.25$

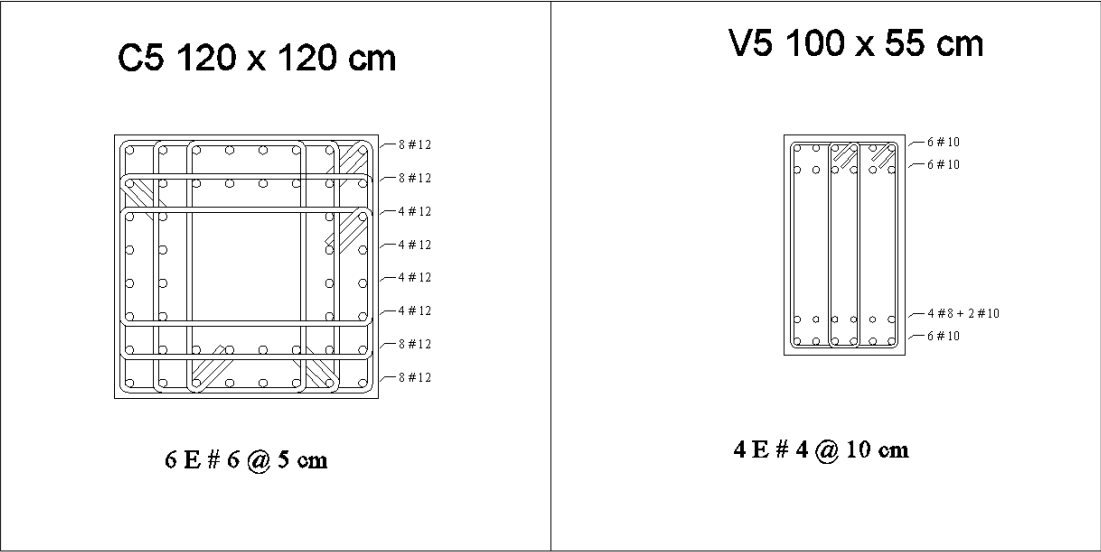


Figura B.20

25 Niveles $\alpha=0.75$

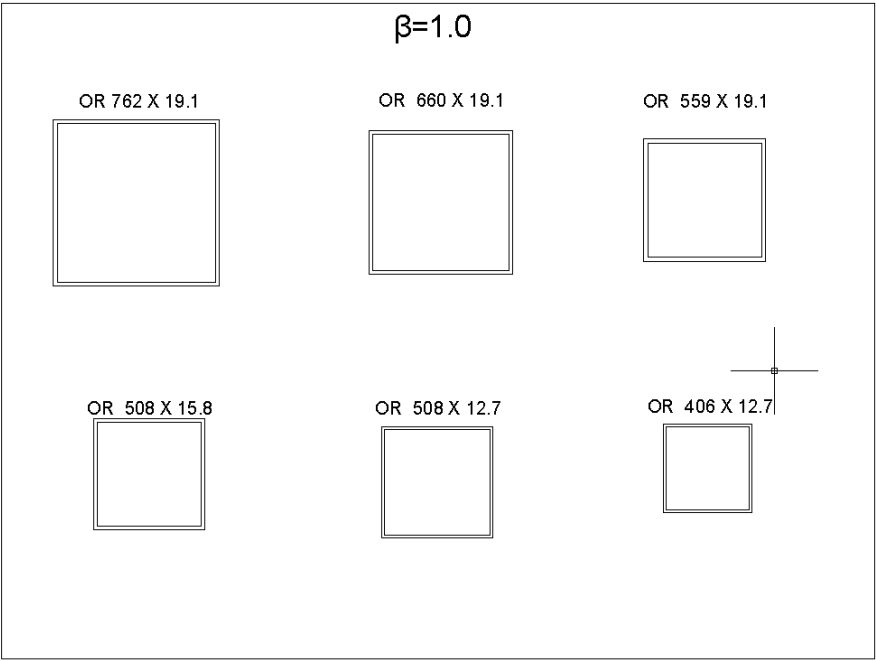


Figura B.21

25 Niveles $\alpha=0.5$

$\beta=0.75$

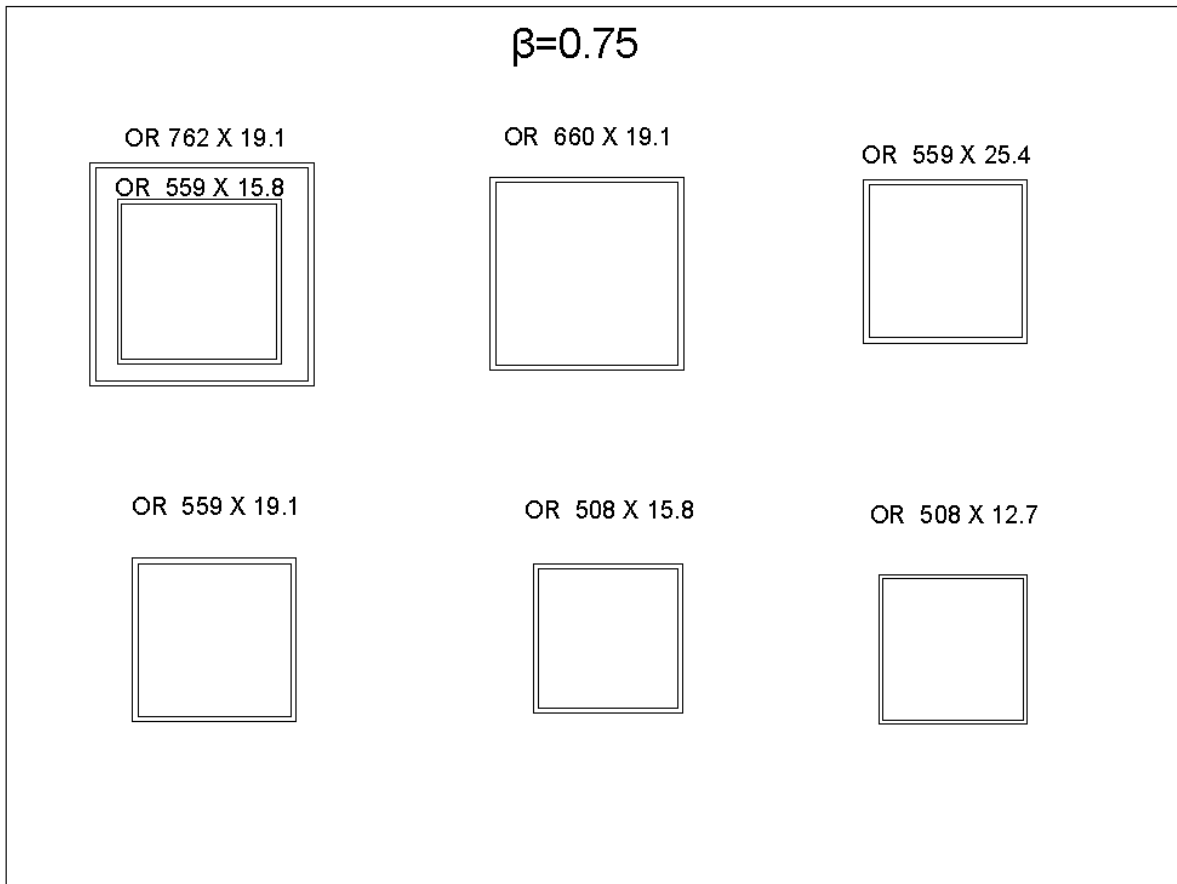


Figura B.22